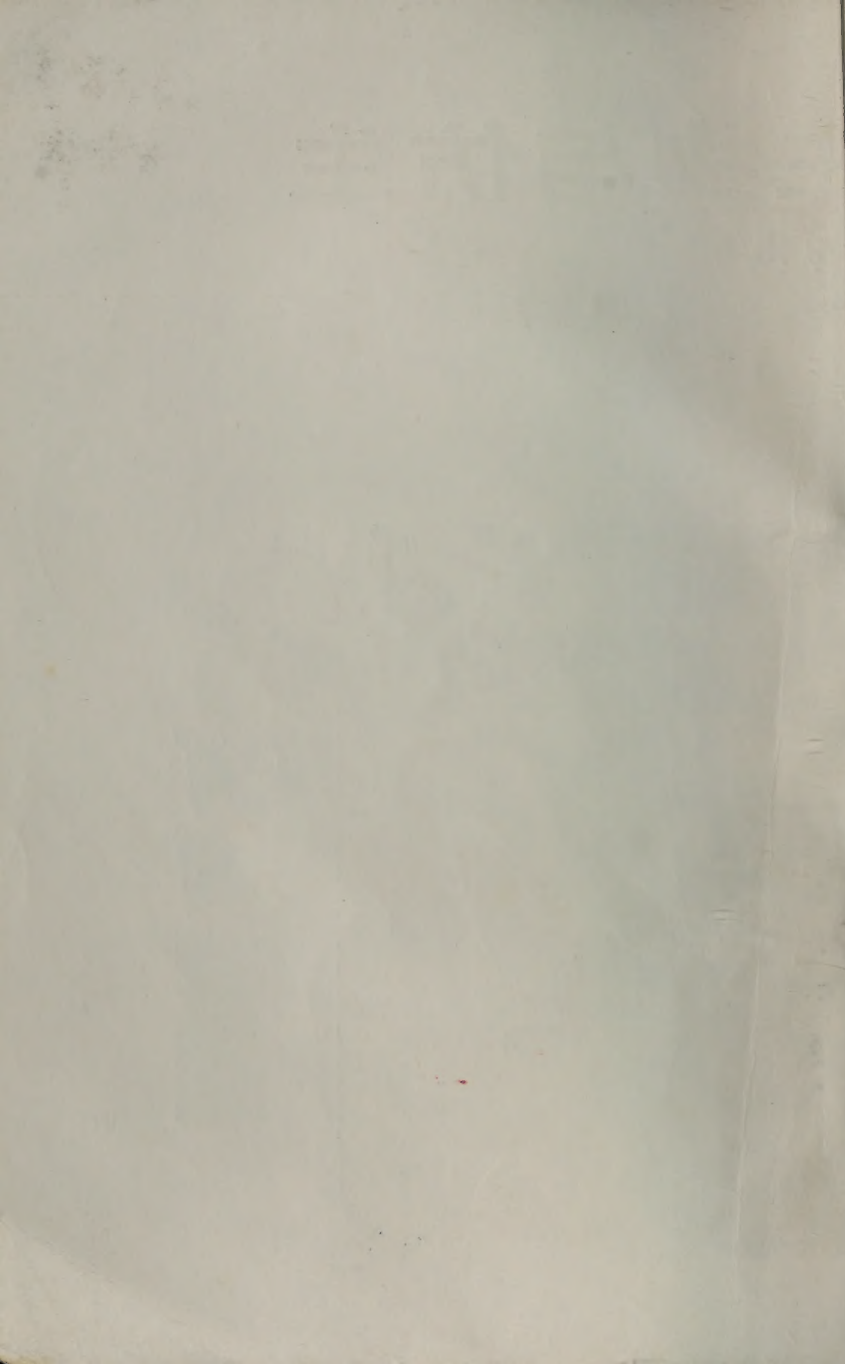


生物与仿生

马祖礼编





58.1719
444

编者的话

生物与仿生

马祖礼 编

仿生学是生物学与工程技术的边缘科学，诞生于二十世纪六十年代初期，至今虽然仅有二十年的历史，但它已渗透到各个学科领域。在现代科学技术发展的过程中，仿生学为工程技术提供了新颖、精巧的构思和方案，发挥了独特的作用。尤其在近十年来，仿生学的发展异常迅速，科研成果层出不穷，累累可见。在我国实现四个现代化而努力奋斗的历史任务中，仿生学也必将发挥重要的作用。《生物与仿生》这本小册子并不涉及仿生学的具体内容，而是以仿生学在某些科学领域内，已经取得若干科研成果为例，向读者介绍仿生学的发生发展概况。为了便于读者了解各项仿生成果的由来，本文也介绍了一些与仿生学有关的知识，例如生物原型的结构与功能、生物体的组成、生物学现象、实现功能的机理、涉及其他学科的基础知识等。这本小册子可供中学教师和学生作为科普读物。由于资料丰富而分散，由马祖礼等同志在工作中若有不妥和错误之处，尚希读者批评指正。

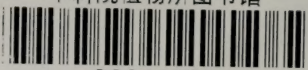


天津科学技术出版社

1979.1.

023805

中科院植物所图书馆



S0014653

8151.82
444

主 物 已 附 主

總 非 地 學



天 師 林 學 科 本 出 版 社

053802

编者的话

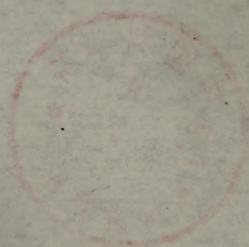
仿生学是生物科学与技术科学之间的一门边缘科学，诞生于二十世纪六十年代初期，至今虽然仅有二十年的历史，但是，已以强大的生命活力渗透到各个学科领域。在现代科学技术发展的历程中，仿生学为工程技术提供了新颖、精巧的生物设计蓝图，发挥了独特的作用。尤其在近十年来，仿生学的发展非常迅速，科研成果五光十色，累累可观。在我国为实现四个现代化而努力奋斗的历史任务中，仿生学也必将发挥重要的作用。《生物与仿生》这本小册子并不涉及仿生学的具体内容，而是以仿生学在某些科学领域内，已经取得的若干科研成果为例，向读者介绍仿生学的发生发展概况。为便于读者了解各项仿生成果的由来，本文也介绍了一些与仿生成果有关的知识，例如生物原型的结构与功能、生物体内的物理、化学现象、实现功能的机理、涉及其他学科的基本知识和资料以及仿生学的设想等。这本小册子可供中学教师教学参考，也可作为大专院校生物系学生的科普读物。

仿生学的内容遍及各个学科领域，资料丰富而分散，由于笔者水平所限，在引用资料和编汇工作中若有不妥和错误之处，敬希读者批评指正。

马祖礼

1979.1.

主 册 己 附 主



1953年10月10日

053802

编 者 的 话

仿生学是生物科学和技术科学之间的一门边缘科学，诞生于二十世纪六十年代初期，至今虽然仅有二十年的历史，但是，已以强大的生命活力渗透到各个学科领域。在现代科学技术发展的历程中，仿生学为工程技术提供了新颖、精巧的生物设计蓝图，发挥了独特的作用。尤其在近十年来，仿生学的发展非常迅速，科研成果五光十色，累累可观。在我国为实现四个现代化而努力奋斗的历史任务中，仿生学也必将发挥重要的作用。《生物与仿生》这本小册子并不涉及仿生学的具体内容，而是以仿生学在某些科学领域内，已经取得的若干科研成果为例，向读者介绍仿生学的发生发展概况。为便于读者了解各项仿生成果的由来，本文也介绍了一些与仿生成果有关的知识，例如生物原型的结构与功能、生物体内的物理、化学现象、实现功能的机理、涉及其他学科的基本知识和资料以及仿生学的设想等。这本小册子可供中学教师教学参考，也可作为大专院校生物系学生的科普读物。

仿生学的内容遍及各个学科领域，资料丰富而分散，由于笔者水平所限，在引用资料和编汇工作中若有不妥和错误之处，敬希读者批评指正。

马祖礼 (85)

1979.1.

(80) 仿生学的由来与发展 (三)
(101) 仿生学的由来与发展 (正)
(103) 仿生学的由来 (一)
(111) 仿生学的由来 (二)
(113) 仿生学的由来 (三)
(121) 仿生学的由来 (四)

目 录

一、仿生学的由来与发展 (1)

(一) 人类仿生由来已久 (1)

(二) 发人深省的对比 (3)

(三) 连接生物与技术的桥梁 (9)

(四) 仿生学的诞生 (12)

(五) 仿生学的研究方法与内容 (14)

二、生命的火花——生物电 (17)

(一) 生物电的发现 (17)

(二) 普遍的生物电现象 (21)

(三) 生物电源 (32)

(四) 生物电的控制 (40)

三、电子学技术与仿生 (51)

(一) 神经元的模拟 (52)

(二) 感觉器官的模拟 (58)

(三) 脑模拟与人工智能 (74)

四、化学与仿生 (85)

(一) 生物体内化学反应过程的模拟 (87)

(二) 生物膜的模拟 (93)

一、仿生学的由来与发展

仿生学是模仿生物建造技术装置的科学。它是在本世纪中期才出现的一门新兴的边缘科学。仿生学研究生物体的结构和功能的工作原理，并将这些原理移植于工程技术之中，发明性能优异的仪器、装置和机器，创造新技术。从仿生学的诞生、发展到现在短短二十年的时间内，它的研究成果已累累可观。仿生学的问世开辟了独特的技术发展道路，这就是向生物界索取设计蓝图的道路，它大大地开拓了人们的眼界，显示了极大的生命力。

（一）人类仿生由来已久

自古以来，自然界就是人类各种技术思想、工程原理及重大发明的源泉。种类繁多的生物界经过长期的进化过程，使它们能适应环境的变化，从而得到生存和发展。劳动创造了人类。人类以自己直立的身躯、能劳动的双手、交流情感和思想的语言，在长期的生产实践中，促使神经系统尤其是大脑获得高度发达。因此，人类以无与伦比的能力和智慧远远超过生物界的所有类群。人类通过劳动运用聪明的才智和灵巧的双手制造工具，从而在自然界里获得更大的自由。人类的智慧不仅仅停留在观察和认识生物界，而且还运用人类所独有的思维和设计能力模仿生物，通过创造性的劳动增加自己的本领。鱼儿在水中有自由来去的本领，人们就模仿鱼

类的形体造船，以木桨仿鳍。相传早在大禹时期，我国古代劳动人民观察鱼在水中用尾巴的摇摆而游动、转弯，他们就在船尾上架置木桨。通过反复的观察、模仿和实践，逐渐改成橹和舵，增加了船的动力，掌握了使船转弯的手段。这样

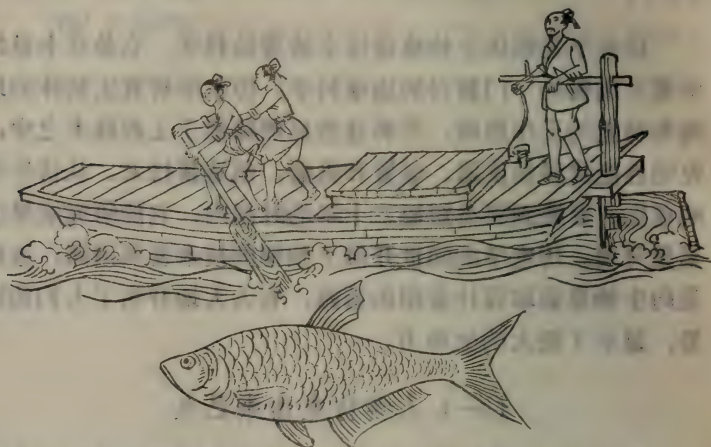


图1 桨、舵——模仿鱼的鳍、尾

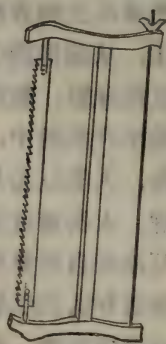
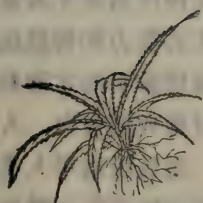


图2 茅草与木锯

即便在波涛滚滚的江河中，人们也能让船只航行自如。

鲁班是我国春秋战国时代杰出的木匠，相传木工的主要工具如刨、斧、钻、锯都是由他发明创造的。有一次鲁班上山伐树时，手指被茅草划破。他观察茅

草叶子的边缘上有许多锋利的小齿，由此受到启发制成了第一把木锯。

鸟儿展翅可在空中自由飞翔。据《韩非子》记载鲁班用竹木作鸟“成而飞之，三日不下。”然而人们更希望模制鸟儿的双翅使自己也能飞翔在空中。早在四百多年前，意大利人利奥那多·达·芬奇（Leonardo da Vinci, 1452~1519）和他的助手对鸟类进行仔细的解剖，研究鸟的身体结构并认真观察鸟类的飞行。设计和制造了一架扑翼机，这是世界上第一架人造飞行器。

以上这些模仿生物结构和功能的发明与尝试，可以认为是人类仿生的先驱，也是仿生学的萌芽。

（二）发人深省的对比

人类仿生的行为虽然早有雏型，但是在二十世纪四十年代以前，人们并没有自觉地把生物作为设计思想和创造发明的源泉。科学家对于生物学的研究也只停留在描述生物体精巧的结构和完美的功能上。而工程技术人员更多的依赖他们卓越的智慧、辛辛苦苦的努力，进行着人工发明。他们很少有意识地向生物界学习。但是，以下几个事实可以说明：人们在技术上所遇到的某些难题，生物界早在千百万年前就曾出现，而且在进化过程中已经解决了，然而人类却没有从生物界得到应有的启示。

在第一次世界大战时期。出于军事上的需要，为使舰艇在水下隐蔽航行而制造潜水艇。当工程技术人员在设计原始的潜艇时，是先用石块或铅块装在潜艇上使它下沉，如果需要升至水面，就将携带的重物扔掉，使艇身回到水面来。以

后经过改进，在潜艇上采用浮箱交替充水和排水的方法来改变潜艇的重量。此后又改进成压载水舱，在水舱的上部设放气阀，下面设注水阀，当水舱灌满海水时，艇身重量增加便可潜入水中。需要紧急下潜时，还有速潜水舱，待艇身潜入水中后，再把速潜水舱内的海水排出。如果一部分压载水舱充水，另部分空着，潜艇便可处于半潜状态。潜艇要起浮时，将压缩空气通入水舱，排海水，艇身重量减轻后就可以上浮。如此优越的机械装置实现了潜艇的自由沉浮。但是后来发现鱼类的沉浮系统比人们的发明要简单的多。鱼的沉浮系统仅仅是充气的鱼鳔。鳔并不受肌肉的控制，而是依靠分泌氧气进入鳔或是重新吸收鳔内一部分氧气来调节鱼鳔中气体含量，促使鱼体自由沉浮。然而鱼类如此巧妙的沉浮系统，对于潜艇设计师的启发和帮助已经为时过迟了。

声音是人们生活中不可缺少的要素。通过语言人们交流

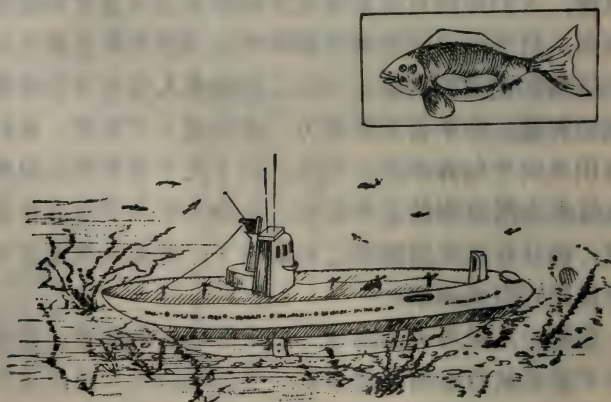


图3 潜水艇与鱼鳔的功能

思想和情感，优美的音乐使人们获得艺术的享受，工程技术人员还把声学系统应用在工业生产和军事技术中，成为颇为重要的信息之一。自从潜水艇问世之后，随之而来的就是水面的舰只如何探查潜艇的位置以防偷袭，而潜艇沉入水中后，也须准确测定敌船方位和距离以利攻击。因此，在第一次世界大战期间，在海洋上，水面与水中敌对双方的斗争采用了各种手段。海军工程师们也利用声学系统作为一个重要的侦察手段。首先采用的是水听器，也称噪音测向仪，通过听测敌舰航行中所发出的噪音来发现敌舰。因为只要周围水域中有敌舰在航行，机器与螺旋桨推进器便会发出噪音，通过水听器就能听到，能及时发现敌人。但是那时的水听器很不完善，一般只是收到本身舰只产生的噪声，要侦听敌潜艇，必须减慢舰只航行速度甚至完全停车才能分辨潜艇的噪音，这样很不利于战斗行动。不久法国物理学家郎之万（Paul Langevin, 1872~1946）研究成功利用超声波反射的性质来探测水下舰艇。用一个超声波发射器，向水中发出超声波后，如果遇到目标便反射回来，由接收器收到。根据接收回波的时间间隔和方位，便可测定出目标的方位和距离，这就是所谓的声纳系统。人造声纳系统的发明以及在侦察敌方潜水艇方面获得的突出成果，曾使人们为之赞叹不已。岂不知远在地球上出现人类之前，蝙蝠、海豚早已对“回声定位”声纳系统运用自如了。生物在漫长的年代里就是生活在被声音包围的自然界中，它们利用声音寻食、逃避敌害和求偶繁殖。因此，声音是生物赖以生存的一个重要信息。早在1793年意大利人斯帕兰赞尼（Spallanzani）发现蝙蝠能在完全黑暗中任意飞行，既能躲避障碍物也能捕食正在飞行中的昆虫，

甚至瞎眼的蝙蝠其飞行本领也毫不逊色。但是堵塞蝙蝠的双耳后，它们在黑暗中则寸步难行了。面对这些事实，斯帕兰赞尼提出了一个使人们难以接受的结论：蝙蝠能用耳朵“看”东西。第一次世界大战结束后，1920年哈台（Hartridge）认为蝙蝠发出声音信号的频率超出人耳的听觉范围。并提出蝙蝠对目标定位的方法与第一次世界大战时郎之万所发明的用超声波回波定位的方法相同。遗憾的是，哈台的提示并未被人们重视，而且工程师们对于蝙蝠具有“回声定位”的技能是难以相信的。直到1938年采用电子测量仪器，测定人类可以听到的音频范围为 $16 \sim 20000$ 周/秒，而蝙蝠发出的音频可达 2 万 ~ 20 万周/秒。至此，完全证实蝙蝠就是以发出超声波来定位的。但是这对于早期雷达和声纳的发明已经不能有所帮助了。

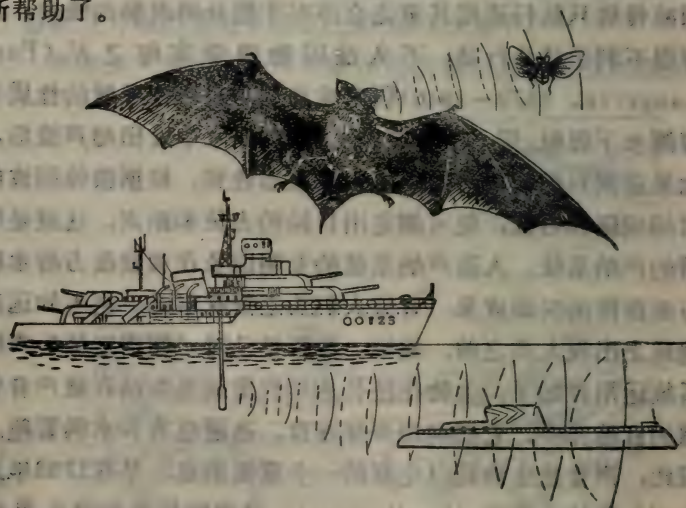


图4 人造声纳系统与蝙蝠的回声定位

另一个事例是人们对昆虫飞行为时过晚的研究。在利奥那多·达·芬奇研究鸟类飞行造出第一个飞行器的四百年之后，人们经过长期反复的实践，终于在1903年发明了飞机，使人类实现了飞上天空的宿愿。由于不断改进，二十年后人们制造的飞机不论在速度、高度和距离等几个方面都超过了鸟类，显示了人类的智慧和才能。但是在继续研制飞行更快更高的新型飞机时，设计师们又碰到了一个新的难题，就是气体动力学中的颤振现象。当飞机飞行时，机翼发生有害的振动，飞行越快，机翼的颤振越烈，甚至使机翼折断，造成飞机坠落，许多试飞的飞行员因而丧生。飞机设计师们为此花费了很大的精力研究消除有害的颤振现象，经过长时间的努力才找到解决这一难题的方法。就是在机翼前缘的远端上安放一个加重装置，这样就把有害的振动消除了。可是，昆虫早在三亿年前就飞翔在空中了，它们也毫不例外地受到颤

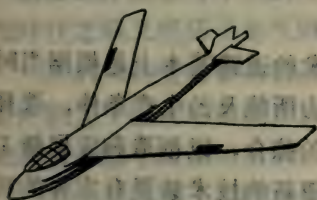


图5 昆虫的翼眼与颤振

振的威胁，经过长期的进化，昆虫早已成功地获得防止颤振的方法。生物学家在研究蜻蜓的翅膀时，发现在每个翅膀前缘的上方都有一块深色的角质加厚区——翼眼或称翅痣。如果把翼眼去掉，飞行就变得荡来荡去。实验证明正是翼眼的角质组织使蜻蜓飞行的翅膀消除了颤振的危害。这与设计师高超的发明何等相似。假如设计师们先向昆虫翅膀探取翼眼的功用，获得有益于解

决颤振的设计思想，就可以避免长期的探索和人员的牺牲了。面对蜻蜓翅膀的翼眼，飞机设计师大有相识恨晚之感！

以上这三个事例发人深省，使人们受到了很大的启发。早在地球上出现人类之前，各种生物已经在大自然中生活了亿万年，在它们为生存而斗争的长期进化过程中，获得了与大自然相适应的能力。人们在生产斗争和发展技术中遇到不少的难题，而生物界则早以人们还不十分清楚的方式完善地解决了。生物学的研究可以说明，生物在进化过程中形成的极其精确和完善的机制，使它们具备了适应内外环境变化的能力。表现在它们有经济而精巧的结构，可靠而协调的功能，最高效率地使用能量。生物界具有许多卓有成效的本领，如体内的生物合成，能量转换，信息的接受和传递，对外界的识别、导航、定向、计算和综合等。显示出许多机器所不可比拟的优越之处。生物的小巧、灵敏、快速、高效、可靠和抗干扰等特性实在令人惊叹不已。

过去，工程技术人员发展技术的道路基本上是根据当时科学技术水平提供的理论，发挥力所能及的生产条件，选择各种人造装置的优点，进行逻辑的综合，以创造和发展新工艺、新机器。但是，人们越是希望新的技术装置有完善的功效，装置的结构也就越加复杂和庞大，操作也越加困难。而且复杂的结构使组成的元件极其众多，如果少数甚至一个元件的损坏就会使整个装置停止工作，使效率和可靠性都受到很大的威胁。这些问题的产生也是如前所述在技术发展道路上是难免的。到本世纪中期，科学技术的发展和生产实践的要求，期待着可靠、灵活、高效和经济的技术设备，这就需要寻求新的系统设计原理和开辟新的技术发展途径。回顾生

物界对人们有益的启示，人们悟出一个新的努力方向。生物界长久以来所走过的道路，已经获得了一些工程技术人员的重视，他们把注意力转向生物系统，踏上模仿生物的道路。当然人类绝不会愚蠢地重踏生物进化的漫长历程，而是以科学技术为手段，发掘出生物界中蕴藏着的极其巧妙的工程技术原理，应用到为人类造福的实践之中。

(三) 连接生物与技术的桥梁

自从瓦特 (James Watt, 1736~1819) 在 1782 年发明蒸汽机以后，人们在生产斗争中获得了强大的动力。在工业技术方面基本上解决了能量的转换、控制和利用等问题，从而引起了第一次工业革命，各式各样的机器如雨后春笋般的出现，工业技术的发展极大地扩大和增进了人的体能，使人们从繁重的体力劳动中解放出来。随着技术的发展，人类在蒸汽时代之后又经历了电气时代并向着自动化时代迈进。

人们从制造简单的机器发展到制造复杂的自动控制装置，积累了极其丰富的知识和宝贵的经验。人们在生产斗争和科学实验中所表现出的巨大智慧和能力发生了质的飞跃。

二十世纪四十年代电子计算机的问世，更是给人类科学技术的宝库增加了可贵的财富，它以可靠和高效的本领处理着人们手头上数以万计的各种信息，使人们从汪洋大海般的数字、信息中解放出来。使用计算机和自动装置可以使人们在繁杂的生产工序面前变得轻松和省力，它们准确、高速的控制着生产程序，使产品规格精确。但是，自动控制装置是按照人制定的固定程序进行工作的，这就使它的控制能力具有很大的局限性。自动装置对外界缺乏自动分析和进行灵活

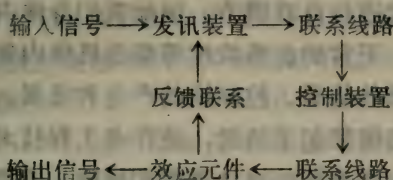
反应的能力，如果发生任何意外的情况，自动装置就要停止工作，甚至以发生事故而告终。这就是自动装置本身所具有的严重弱点，要克服这种弱点，无非是使机器各部件之间，机器与环境之间能够“通讯”。也就是使自动控制装置具有适应内外环境变化的能力。要解决这一课题，在工程技术中就要解决如何接受、转换、利用和控制信息的问题。因此，信息的利用和控制就成为工业技术发展的一个主要矛盾。如何解决这个矛盾呢？生物界给人类提供了有益的启示。

人类要从生物系统中获得启示，首先就需要研究生物和技术装置是否存在有共同的特性。1940年出现调节理论，将生物与机器在一般意义上进行对比。到1944年，一些科学家已经明确了在机器和生物体内，在通讯、自动控制与统计力学等一系列的问题上都是一致的。在这样的认识基础上，在1947年一个新的科学——控制论产生了。“控制论”（Cybernetics）是从希腊文而来，原意是“掌舵人”。按照控制论的创始人之一维纳（Norbert Wiener，1894~1964）给予控制论的定义是：“关于在动物和机器中控制和通讯”的科学。虽然这个定义过于简单，仅仅是维纳关于控制论经典著作的副题，但它却是直接了当地把人们对生物和机器的认识联系在一起了。

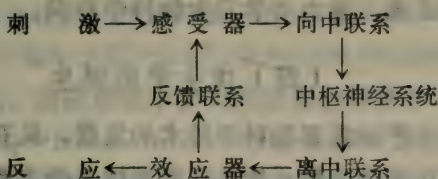
控制论的基本观点认为：动物（尤其是人）与机器（包括各种控制、通讯、计算的自动化装置）之间有一定的共性，也就是在它们具备的控制系统内有某些共同的规律。根据控制论研究表明，各种控制系统的控制过程都包含有信息的传递、变换与加工过程。为保持控制系统工作正常，必然取决于信息运行过程的正常。所谓控制系统是指由被控制的

对象及各种控制元件、部件、线路有机地结合成有一定控制功能的整体。从信息的观点来看，控制系统就是一部信息通道的网路或体系。我们不妨将机器的控制系统和生物机体的自动调节控制系统作一对比。

机器自动控制系统：



生物自动控制系统：



通过以上对比可以看出：机器与生物体内的控制系统有许多共同之处，于是人们对生物自动控制系统产生极大的兴趣，并且采用物理学的、数学的甚至是技术的模型对生物系统开展进一步的研究。因此，控制论成为联系生物学与工程技术的理论基础，成为沟通构成生物系统与技术系统连接的桥梁。

生物体和机器之间确实有很明显的相似之处。这些相似性可以表现在对生物体研究的不同水平上。由简单的单细胞到复杂的器官系统（如神经系统）都存在着各种调节和自动控制的生理过程。我们可以把生物体看成是一种具有特殊能

力的机器，和其他机器的不同就在于生物体还有适应外界环境和自我繁殖的能力。也可以把生物体比作一个自动化的工厂，它的各项功能都遵循着力学的定律。它的各种结构协调地进行工作。它们能对一定的信号和刺激作出定量的反应，而且也象自动控制装置一样，借助于专门的反馈联系组成自动控制的方式进行自我调节。例如我们身体内恒定的体温、正常的血压、正常的血糖浓度等都是机体内复杂的自动控制系统进行调节的结果。控制论的产生和发展，为生物系统与技术系统的连接架起了桥梁，使许多工程技术人员都自觉地向生物系统去寻求新的设计思想和原理。于是出现了这样一个趋势，工程师们为了和生物学家在共同合作的工程技术项目中获得成果，就主动学习生物科学知识。

（四）仿生学的诞生

随着生产的需要和科学技术的发展，从五十年代以来，人们已经认识到生物系统是开辟新技术的主要途径之一。自觉地把生物界作为各种技术思想、设计原理和创造发明的源泉。人们用化学、物理学、数学以及技术模型对生物系统开展深入的研究，促进了生物学的极大发展，对生物体内功能机理的研究也取得了迅速的进展。此时模仿生物不再是引人入胜的幻想，而成了可以做到的事实。生物学家和工程师的积极合作，开始将从生物界获得的知识用来改善旧的或创造新的工程技术设备。生物学开始跨入各行各业技术革新和技术革命的行列，而且首先在自动控制、航空、航海等军事部门取得了成功。于是生物学和工程技术科学结合在一起，互相渗透孕育出一门新兴的科学——仿生学。回顾仿生学从孕

育到诞生和发展的全部过程就正如恩格斯所指出的：“科学的发生和发展一开始就是由生产决定的。”仿生学的发生和发展正是适应生产发展的需要，才应运而生。

仿生学作为一门独立的科学，于1960年9月正式诞生。由美国空军航空局在俄亥俄州的空军基地戴通（Dayton）召开了第一次仿生学会议。会议讨论的中心议题是“分析生物系统所得到的概念能够用到人工制造的信息加工系统的设计上去吗？”斯梯尔（Jack. Ellwood Steele）为新兴的科学命名为“Bionics”。这个字来自希腊文“Bion”字意是“生命的单位”。而拉丁字“Bios”是“生命方式”的意思。其字尾“ic”是“具有……性质”的意思。因此“Bionics”意味着研究生命系统的功能的科学，1963年我国将“Bionics”译为“仿生学”。其中字尾“ics”与“Electronics”（电子学）的字尾相同，因此曾使不少人将仿生学理解为“Biology”（生物学）与“Electronics”的复合字，曾一度译为“生物电子学”是不恰当的。斯梯尔给予仿生学的定义为“仿生学是模仿生物系统的原理来建造技术系统。或者使人造技术系统具有或类似于生物系统特征的科学。”简言之，仿生学就是模仿生物的科学。确切地说：仿生学是研究生物系统的结构、物质、功能、能量转换、信息控制等各种优异的特征，并把它们应用到技术系统，改善已有的技术工程设备，并创造出新的工艺过程、建筑构型、自动化装置等技术系统的综合性的科学。从生物学的角度来说，仿生学属于“应用生物学”的一个分支。从工程技术方面来看，仿生学是根据对生物系统的研究，为设计和建造新的技术设备提供了新原理、新方法和新途径。仿生学的光荣使命就是为人类提供最

可靠、最灵活、最高效、最经济的接近于生物系统的技术系统，为人类造福。

(五) 仿生学的研究方法 with 内容

仿生学是生物学、数学和工程技术学互相渗透而结合成的一门新兴的边缘科学。第一届仿生学会议为仿生学确定了一个有趣而形象的标志：一个巨大的积分符号，把解剖刀和电烙铁“积分”在一起（图6）。这个符号的含意不仅显示出仿生学的组成，而且也概括地表达了仿生学的研究途径。

仿生学的任务就是要研究生物系统的优异能力及产生的原理，并把它模式化，然后应用这些原理去设计和制造新的技术设备。仿生学的主要研究方法就是提出模型，进行模拟。其研究程序大致有以下三个阶段：

首先是对生物原型的研究：根据生产实际提出的技术问题，选择性的研究生物体的某些结构和功能，在此基础上，将研究所得的生物资料予以简化，吸收对技术要求有益的内容，取消与生产技术要求无关的因素，得到一个生物模型。第二阶段是将生物模型提供的资料进行数学分析，并使其内在的联系抽象化，用数学的语言把生物模型“翻译”成有一般意义的数学模型。最后的阶段是采用电子的、化学的、机械的手段，根据数学模型制造出可在工程技术上进行实验的实物模型。当然在生物模拟的过程中，不仅仅是简单的仿生，更重要的是在仿中有创新。经过实践——认识——再实践的多次反复，才能使模拟出来的东西越来越符合生产

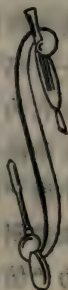


图6 仿生学的标志

的需要。这样模拟的结果，使最终建成的机器设备将与生物原型不同。在某些方面甚至超过原来生物模型的能力。例如今天的飞机在许多方面都超过了鸟类的飞行能力，电子计算机在复杂的计算中要比人的解题能力迅速而可靠。

仿生学的基本研究方法使它在生物学的研究中表现出一个突出的特点，就是整体性。从仿生学的角度来看，它把生物体看成是一个能与内外环境进行联系和控制的复杂系统。它的任务就是要研究复杂系统内各部分之间的相互关系以及整个系统的行为和状态。生物最基本的特性就是生物的自我更新和自我复制。它们与外界环境的关系是密不可分的。生物从环境获得物质和能量，才能进行生长和繁殖。生物从环境中接受信息，不断地调整 and 综合，才有适应和进化。长期的进化过程使生物获得结构和功能的统一，局部与整体的协调统一。仿生学要研究生物体对外界刺激（输入信息）引起反应（输出信息）之间的定量关系。即着重于数量关系上的统一性，才便于进行模拟。为达此目的，采用任何局部的分析方法都不能获得满意的效果。因此，仿生学的研究方法必须着重在整体。

仿生学的研究内容是极其丰富多采的，因为生物界本身就包含着成百万的种类，它们具有各种优异的结构和功能供各行各业来研究。自从仿生学问世以来的二十年内，仿生学的研究得到迅速的发展，而且取得了很大的成果。就其研究范围可包括电子仿生、机械仿生、建筑仿生、化学仿生等。随着现代工程技术的发展、学科分支繁多，在仿生学中相应地开展对口的技术仿生研究。例如：航海部门对水生动物运动的流体力学的研究；航天部门对鸟类、昆虫飞行的模拟、

动物的定位与导航；工程建筑对生物力学的模拟；无线电技术对于神经细胞、感觉器官和神经网络的模拟；计算机技术对于脑的模拟以及人工智能的研究等。在第一届仿生学会议上发表的比较典型的课题有：“人造神经元有什么优点？”“设计生物计算机中的问题”，“用机器识别图象”，“学习的机器”等。可以看出是以电子仿生的研究比较广泛。仿生学的研究课题多集中在以下三种生物原型的研究，即动物的感觉器官、神经元、神经系统的整合作用。以后在机械仿生和化学仿生方面也随之开展起来，近些年来又出现新的分支，如人体仿生学、分子仿生学和宇宙仿生学等。

总之，仿生学的研究内容，从模拟微观世界的分子仿生学到宏观的宇宙仿生学包括了何等宽广的天地。而当今的科学技术正是处在一个各种自然科学高度综合和互相交叉、渗透的新时代，仿生学通过模拟的方法把对生命的研究和生产实践结合起来，同时对生物学的发展也产生了极大的推动作用。在其他学科的渗透和影响下，使生物科学的研究在方法上发生了根本的变革。在内容上也从描述和分析的水平向着精确和定量的方向深化。生物科学的发展又是以仿生学为渠道向各种自然科学和技术科学输送宝贵的资料和丰富的营养，加速科学的发展。因此，仿生学的科研实践显示出无限的生命力，它的发展和成就将为我国实现四个现代化作出巨大的贡献。

二、生命的火花——生物电

生物界各种生命活动都伴随有电现象。毫不夸张的说，凡是有生命活动就有生物电。生物电是生物系统内一种普遍的现象，是生命活动过程的一个表现。电变化反映着生命活动中某些物理学的或物理化学的变化。生物电活动与机体的生理活动相生相长，与新陈代谢密切相联系，一旦生命停止，电现象也就消逝了，因此，生物电现象有“生命的火花”之称。

（一）生物电的发现

人类在很早以前就观察到生物电现象，在埃及第五王朝（公元前2600年）的古墓穴中的壁画上就有电鲛的画象。公元前300多年，古希腊人亚里士多德（Aristotle，公元前384~322）记载地中海电鳐（Torpedo）有强烈的“震击”作用，以后的资料陆续记载了非洲尼罗河内的电鲛（Electric catfish）和美洲电鳗（Electric eel）。它们都具有发电器官，产生的电脉冲相当大，足以刺痛人和杀死小动物。早在一世纪罗马的医生就建议用电鳐的放电来治疗痛风、头痛和癫痫。在1678年，荷兰的生物学家斯威莫尔登（Jan Swammerdan）用蛙的肌肉作实验，他把肌肉放在玻璃管内，用一根银丝和一根铜棒去触及肌肉，可以引起肌肉的收缩活动，这个现象并没有引起人们的注意。一百多年后，意大利的医生和生理学家伽伐尼（Galvani）重复了这个实验，他

采用蛙的神经肌肉来研究放电现象。

伽伐尼在蛙的后肢上剥离出坐骨神经干和腓肠肌，并使坐骨神经发出的神经支与腓肠肌的联系完整无损。制成坐骨神经——腓肠肌标本，这是一种活体标本，当它离开整体后的一些时间内，还可以保存生理活性，如果刺激坐骨神经就可以引起腓肠肌的收缩。1786年，伽伐尼用金属导体在蛙的腓肠肌和神经之间建立一个通路，肌肉就发生颤抖式的收缩活动。他认为在肌肉与神经上带有相反的电荷，而外加的金属导体只不过是將神经和肌肉接通形成了回路所致。并在1791年发表论文，宣称动物的组织可以产生动物电。

同时代的意大利物理学家伏打 (Valta, 1745~1827) 对伽伐尼的实验结果提出异议，他认为由于伽伐尼实验中所用导体的金属属性不同，两种不同的金属相接触就可以产生电位差。神经肌肉上的组织液是含有电介质的，因此，用金属与组织液接触时就产生了电流，是外加电流刺激肌肉才产生颤抖现象。

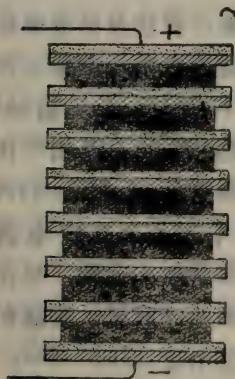


图7 世界上第一个直流电池——伏打电池

伏打与伽伐尼的争论促使他们各自进行进一步实验，来验证自己的论点正确。伏打采用一组铜板和一组锌板，中间用浸有盐水的呢绒相隔开，由于不同的金属与电介质相接触而产生电位差，由此制出了世界上第一个直流电池(图7)，称为“伏打电池”。

伽伐尼舍去金属作为通路，他用

一神经肌肉标本上的神经放在另一个肌肉标本的损伤处（图8），结果引起第一个神经肌肉标本上的肌肉发生收缩现象，即发现了“无金属接触收缩”，有力地证明了生物电的存在。

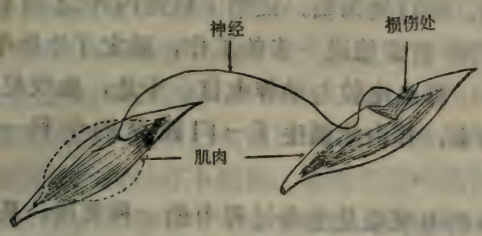


图8 伽伐尼的无金属接触收缩实验

因此，可以说人类关于生物电现象的系统研究，就是起源于伽伐尼与伏打的有益争论。而且在1820年以前，即电流计尚未发明之前，物理学家也常用蛙的神经肌肉标本来代替电流计。以上争论的问题只有在制造出合适的电测量仪器后才能澄清。1820年意大利物理学家诺贝利（Nobili）制出了第一台电流计，并用此证明了肌肉电流的存在。1845年麦狄西（Matteucci）用两个蛙的坐骨神经——腓肠肌标本进行实验。他将第二个标本的神经搭放在第一个标本的肌肉上（图9），当刺激第二个标本的神经时，不仅第一个标本的肌肉发生收缩，第二个标本的肌肉也会发生收缩。实验说明第一个标本的肌肉在收缩时产生的电流对第二个标本的神经产生了

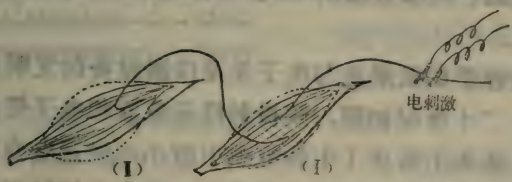


图9 麦狄西实验

刺激作用所致。此后，麦狄西与杜波伊斯-雷蒙德（DuBois-Reymond）将电流计的一端与正常肌肉的表面相接触，另一端与肌肉的切口处相接触，就有电流产生，肌肉正常部位的表面为正、切口处为负，证明了肌肉内外之间存在电势差。杜波伊斯-雷蒙德进一步的工作，确定了生物电有两种基本形式——静息电位与动作电位。于是，伽伐尼与伏打的争论就此结束，并由此诞生了一门独立的学科——电生理学。

生物体的电现象是生命过程中的一种表现，是生理活动中的电现象。作为一种生理现象，它是生理学研究对象的一部分。而作为生物体内所产生的一种物理现象来说，它又是生物物理学研究对象的一部分。因此电生理学是生理学和生物物理学之间的一门边缘科学。它的任务是研究生物电活动的特性、规律、产生的机制以及与电变化相适应的生理学和物理化学基础。最终目的是揭露生命活动的奥秘。此外，电生理学也是一种研究方法，在自然界中高等哺乳动物具有最完善的调节系统，其中神经系统又起主导作用。利用神经系统活动时所产生的电变化作为指标，研究神经系统的活动规律，分析神经冲动的传导途径，尤其是研究大脑电活动的本质、信息的传递与综合的机能等，对于生物控制论的发展、人工模拟脑、人工智能的研究，将在理论和实践上都有极重要的意义。

电生理学的发展史与电子学及仪器设备的发明创造有密切关系，二十世纪初期，阴极射线示波器和电子管放大设备的出现，基本上解决了生物组织中微小而快速电变化的记录问题。此后随着微电极技术的使用，使单个神经细胞电活动

的研究成为可能，因而有力地推动了电生理学的迅速发展。

(二) 普遍的生物电现象

动物界的电现象。电子仪器的大量涌现和电生理学的发展，使人们认识到生物界普遍存在电现象。动物电的发现和研究，首先是由伽伐尼在蛙的骨骼肌上进行的。此后采用电流计进行测量时发现，如果把电流计的两个电极都放在肌肉的表面时，电流计的指针并不偏转，说明完整的肌肉表面上各点间的电位相等。若将其中一个电极插入肌肉内，电流计的指针即刻发生偏转，肌膜内为负、肌膜外为正。测量结果表明肌肉在安静状态时，肌膜内外之间存在一个电位差，人们称它为静息电位（或称膜电位）。如果把一个电极放在肌肉的完整处，另一个电极放在肌肉的损伤处，两电极之间也存在

电位差，称为损伤电位。在损伤处表现为负（图10）。

伽伐尼著名的“无金属收缩实验”就是由于把神经分别放在一块肌肉的完整处和损伤处，神经在肌肉损伤处电位刺激下发生兴奋，才使试验标本的肌肉发生收缩。

如前所叙，麦狄西采用双标本的收缩实验

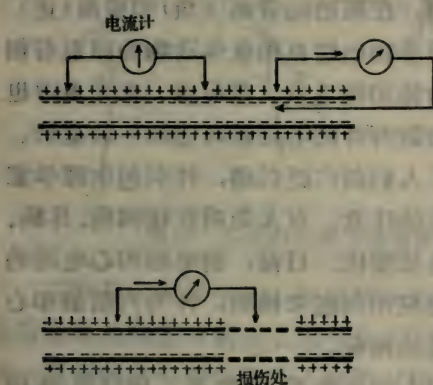


图10 静息电位与损伤电位

上图显示静息电位

下图显示损伤电位

说明：当肌肉发生兴奋而收缩时，肌肉的表面上也出现了电变化。用电位计检查，两个电极都放在肌肉表面，静息时两个电极间无电位差。当肌肉兴奋

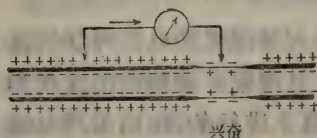


图11 动作电位

时，电位计指针即瞬间偏转，指出发生兴奋的部位为负。兴奋部位与安静部位之间的电位差称为动作电位（图11）。

采用精密的电子仪器，分别对不同动物的肌肉和神经进行测量，它们的静息电位约60~90毫伏；动作电位约90~120毫伏。继神经肌肉电现象的研究之后，又相继在其他器官和组织中也发现电现象并进行了测量。如腺体、皮肤、胃、肠道、肾皮质、肝细胞、癌细胞等都表现有电动势。如豚鼠肝细胞为36毫伏，猫肝细胞为34毫伏，肾皮质细胞为35毫伏。此外，对鸡卵的研究表明，在胚胎的背面（负）和腹面（正）之间存在电位差，在低等动物如蠕虫和软体动物的卵也有相同的现象，甚至在原生动物和鞭毛虫、变形虫、夜光虫中也可测出电动势。夜光虫细胞内外的电位差可达48~50毫伏。活机体内的电现象激发了人们的广泛兴趣，并引起生理学家和医学家们对人体电现象的注意。有人先后在视网膜、耳蜗、心脏和大脑皮层引导出电位变化。目前，脑电图和心电图的描记和分析，已经广泛地应用到临床诊断，作为判断脑和心脏活动的生理与病理变化的指标。

很早以前人们就发现人的身体也产生电。1876年玛瑞（Marey）发现心脏收缩时伴有电反应。这种电反应的复杂形式不同于骨骼肌电反应形式，引起了大家的注意。心脏在跳动时甚至在皮肤表面上也产生1~2毫伏的电压。1903年

爱因索文 (Einthoven) 发明了弦线电流计, 促进了对心肌动作电流的深入研究, 借助弦线电流计可以记录整体内的心脏电活动, 并在临床上迅速获得广泛的应用。爱因索文为测定心脏动作电流确定了三种标准导程(图12): I 为右手——左手; II 为右手——左脚; III 为左手——左脚。



图12 心电图标准导联连接方式示意图

三种导程记录出的心脏电活动是由许多波组成, 按各波先后出现的顺序分别命名为P波、Q波、R波、S波、T波。这一系列的电位变化称为心电图(缩写为ECG)。其中P波代表左右两个心房肌的兴奋过程, QRS波群代表左右两个心室肌的兴奋过程, 典型的QRS包括三个相连的波形, 第一个向下的波为Q波、其后是一个向上的尖锐型的波为R波,

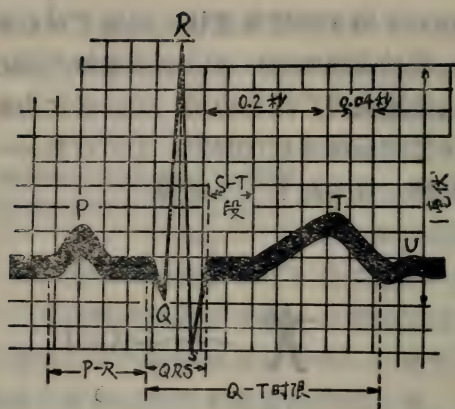


图13 人类的典型心电图

R波之后又是一个向下的波为S波。在QRS波群之后是一个持续时间较长的T波，它代表心室肌兴奋后恢复时期的电流变化（图13）。心脏病人的心电图各波的波形、幅度、占有时间以及波形偏转

方向等方面不同于正常心电图，这就是利用心电图诊断心脏疾病的依据。随着临床心电图的发展又增加其他记录方法，如单极导联、加压导联、胸导联及食道导联（把探查电极放入食道中）。这些导联的方法并无本质上的差别，只是从不同的方位反映同一心肌的电活动。它们在心脏疾病的诊断中相辅相成，以利于正确的诊断。半个世纪以来，心电图学已经发展成一门新的科学，目前在临床上采用心电图的图象识别机分析心电图，可以迅速准确地诊断心脏异常，用来监护垂危病人以利及时抢救。通过遥感系统还可以监护宇宙飞行员的心脏活动。

关于大脑皮层上电活动的发现，起始于1875年俄国人达尼里夫斯基（В. Е. Данилиевский），他用声音刺激狗的听觉器官时，首次观察到狗的大脑皮层上出现生物电流。同年美国人卡通（Caton）也发现暴露的兔脑上能产生电变化。以后许多科学家对脑的电现象进行研究，1924年德国人

柏格 (Breger) 用两根白金针刺入精神病患者的头皮并与颅骨相触，首次记录了人类的脑电图。柏格发现当正常人在休息和闭眼时，在头的顶区和枕区可以引出一种有节律的电波，频率为每秒 8~12 次，电压大约为 50 微伏。柏格命名此节律为 α 节律，如果使被试者睁眼看物时 α 节律便消失，代替以 18~20 次/秒，振幅为 20~30 微伏的较快的节律波，并命名为 β 节律。柏格发现 β 节律还可以出现在皮层的运动区，他

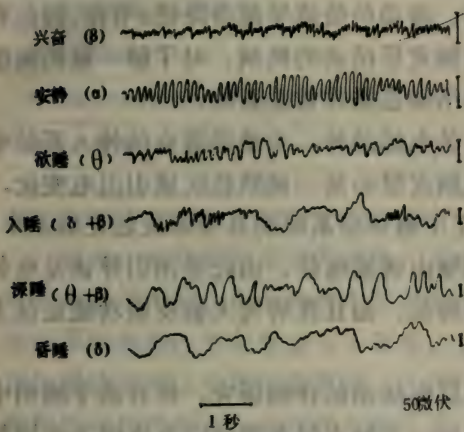


图14 人类脑电图

认为 α 、 β 两种节律的波型是脑的正常放电，由此命名为脑电图 (EEG)。到三十年代后期，脑电图技术开始出现于临床。并不断改进记录方法，使用圆形记录电极置于头皮上即可将脑电图引出。人的脑电图除了 α 和 β 两种

波型外，还有两种慢波，即 δ 波（频率为 0.5~3 次/秒、波幅为 20~200 微伏）和 Q 波（频率 4~7 次/秒、波幅 20~40 微伏），它们较为少见，一般在沉睡或幼儿时期出现（图14）。

脑电波是大脑皮层神经细胞自发性的有节律性的交替放电。如果一个圆形记录电极的直径是 1 厘米，那么电极的下面大约有 100 万个脑神经细胞，由此引出的脑电波就是许多皮层神经细胞电活动同步性作用的综合结果。患脑外伤、癫

病、精神病或颅内占位性病变（如脑肿瘤、血肿、脓肿）等病人，其脑电图均发生异常改变。因此脑电图在临床上具有重要的诊断价值。脑电图技术应用于临床后不久，发生了第二次世界大战，战争双方都采用脑电图技术来挑选飞行员和确定颅内损伤的位置。此外，脑电图的节律随身体的机能状态（低血糖、缺氧、麻醉、疲劳、睡眠）而变化。人的精神状态对脑电活动也有很大影响，如紧张的脑力劳动、恐惧、对某事物的兴趣高涨、激动的情感等都会降低 α 节律。因此利用脑电图对于探讨大脑皮层活动的机制、对了解一般的高级神经活动特别是心理活动也是非常重要的。

大脑除了有自发的电活动外，当感觉器官的传入系统受到刺激时，可以在大脑皮层的某一局限性区域引出电变化，称为皮层诱发电位。在中枢神经系统的其他部位如丘脑水平、中脑水平等也可以引导出诱发电位。由此采用引导诱发电位来研究感觉系统投射部位，而且在研究大脑皮层功能定位方面也有重要的作用。

总之，对大脑皮层电活动的详细研究，将有助于阐明中枢神经系统各部分之间、大脑皮层各部分以及皮层下不同细胞成分相互作用的机制。对于脑模拟、发展人工智能、对人工电脑的研制等仿生学的重大课题也是非常重要的。

植物界的电现象。植物机体与动物一样也有电现象。早在上一世纪后叶已经观察到植物电现象，大量的实验证明电现象既为植物细胞和组织所有，也为整个植物体所有。植物损伤部位与完整部位之间存在电位差，损伤部位较完整部位呈现负电位。但是植物的损伤电位相当迅速地减小，某些植物的损伤部位甚至可改变电位方向，表现为较完整部位为正

电位，这是与动物的损伤电位所不同的。下表列出测定不同植物的损伤电位以及随时间而变化的资料：

实 验 材 料	损伤电位 (毫伏)	
	损伤后即刻	损伤 1 小时后
荆球花(<i>Acacia</i> SP.)	- 32	- 8
耳环花(<i>Fuchsia</i> <i>Corymbosa</i>)	- 68	- 23
石竹(<i>Silene</i> <i>maritima</i>)	- 26	+ 6
凤仙花(<i>Impatiens</i>)	- 66	- 5
白羽扇豆(<i>Lupinus</i> <i>albus</i>) 胚芽、子叶	- 120	- 4
落地生根(<i>Briophyllum</i> <i>Calycinum</i>)	- 56	-
茄(<i>Solanum</i> <i>Lycopersicum</i>)	- 66	- 47

对单一植物细胞的研究表明，正如动物一样，植物的电现象源于活细胞。在一些淡水藻类如车轴藻或假车轴藻有巨大的节间细胞，其长度至少 3 厘米，直径约 0.3~0.5 毫米。在显微镜下可以看到细胞浆流。这种巨大的细胞很适于进行细胞膜电位的研究。采用微电极技术，将一个微电极（电极尖端直径为 20~30 微米）插入节间细胞内，测定静息电位为 150 毫伏，膜内为负。当细胞局部损伤时，通过其损伤部位显示为负电位。若用热凝方法或以 20% 乙醇作用于细胞的一端使其受损伤后，细胞损伤的一端要比另一端负 110~130 毫伏。在损伤部位内细胞浆流立刻停止，而在其他部位仍不改变，然而经过几十分钟以后，电位差逐渐减少至零，细胞浆流也逐渐停止，显然细胞已经死亡。可见，蕴藏于细胞内的那种电动势只有在损伤时才表现出来，而且电位的大小与细胞的

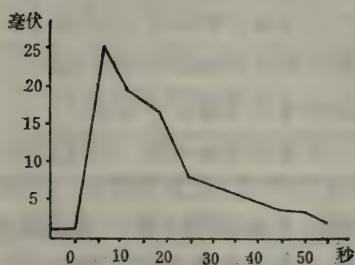
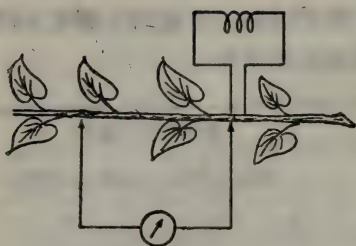


图15 植物组织对交流电刺激的反应

上图为实验装置

下图为植物电反应变化的时程

机能状态密切相关。

植物对于机械（如折曲）、化学、温度和电刺激起反应时，也有电位产生，对刺激产生的电反应以刺激作用部位为负，电反应的幅度决定于刺激强度。在刺激后的几秒钟内，电位幅度可达到最大值，但电反应衰减的时间却要长得多。图15表示植物组织对交流电刺激的反应。

在绝大部分的植物中，对外界刺激的反应仅限于受刺激的区域，然而有些植物对于远离区域的刺激，可以产生运动反应同时伴有电变化。例如含羞草对外界刺激发生反应，其兴奋可以扩散，在兴奋经过的途径上植物的运动反应表现为叶子的闭合，而电反应则是一种负电变化，振幅可达50~100毫伏。从刺激点向外扩布的速度为2~10毫米/秒，电位振幅在1~2秒内达到最大值。但电位下降的幅度却要慢得多。含羞草的叶子闭合后处于折叠状态也停留一个比较长的时间，因此其电反应在较长时间内保持一定的幅度，这是与叶子的机械反应恢复缓慢的过程相对应的。

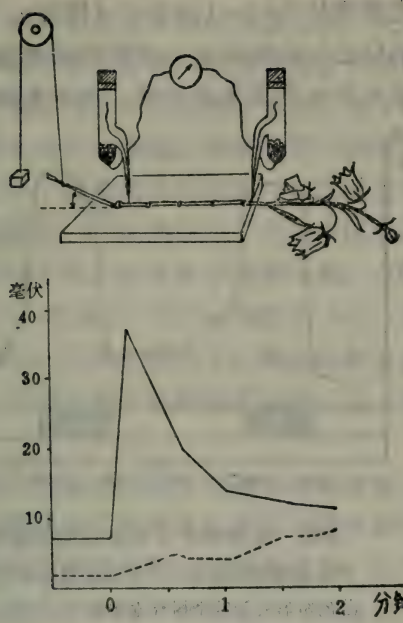


图16 植物组织对折曲的电反应
 上图为实验装置 下图为电反应变化的时程

植物在光合作用中也有电位产生。在植物受光照射部分和黑暗部分之间，或叶绿体含量不同的两个区域之间，在光合作用时其光化学反应的强度有较大差别。不仅表现在氧的产生和二氧化碳的消耗有所不同，也表现出有电位差。采用太阳草 (*Elodea Canadensis*) 的叶子作实验材料，由于它的结构简单，只有一根中央叶脉和两层细胞组成，很适宜用来进行实验。实验时将叶子的一半用黑罩遮住，然后将电极分别置于叶子光照部位与黑暗部位。在几分钟之内叶子的黑

暗部分比光照部位负50~100毫伏（图17）。而且在一定的限度内，两部位之间的电位差与照射的强度差成正比。若将黑罩除去，原来的电位又重新出现。由于光合作用决定于叶绿

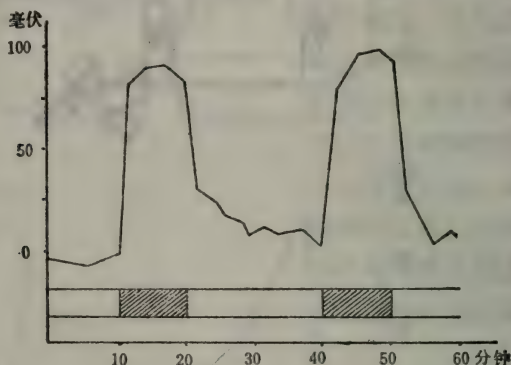


图17 太阳草叶子光合作用的电位

图中有斜线的矩形表示作用电极处受光照

白色矩形表示整个树叶在黑暗中

电位以照射处为正

素的存在，因此在有斑纹的树叶上，同一光照强度下，绿色和无色素部位之间也出现一个电位差。例如以天竺葵（*Pelargonium zonale*）叶子做实验，将一个电极放在叶子的绿色部分，另一个电极置于无色素部位，当处于黑暗中时，两个电极之间的电位差很小。当突然曝光时，两部位之间即出现较大的电位差，而且照射越强时电位差越大。

植物叶子受光照部位与黑暗部位之间的电位差是由光合作用代谢过程的差异所引起的。所有的花草、蔬菜和树木的绿叶都可以证明有光合作用电位存在，但在不同的植物中，这种电位的极性、大小和时程却有相当大的差异。

光合作用是一切生物赖以生存的基础过程。在光合作用中，叶绿体是一个出色的换能器，它能把光能转换成生物可以利用的化学能。太阳光照到植物的叶子上，光子被叶绿素吸收，根据爱因斯坦的光电理论，物质得到一个光子就可以放出一个电子。因此，增加光线的强度（光的波长不变）就可增加放出电子的数目。叶绿素吸收一个光子以后，总的结果是可以射出一个电子来，在光合作用的初期，水分子被日光分解成氧气（ O_2 ）、氢离子（ H^+ ）和电子（ e ），如果人们对光合作用进行模拟，使产生的电子汇集在电极处，就可以造成光化学电池，开辟日光能利用的新途径，为人类提供新的能源。

总之，大量的事实说明生物界普遍存在电现象。对以上各种生物组织在安静状态下电动势的测量和研究表明：一切活细胞的内含物和外表面之间都存在着电位差。这个电位差随着细胞的死亡而消失。不同的细胞或同一细胞处于不同状态时，它们的电位差数值不同，一般可达到数十毫伏。细胞的电生理学研究表明：细胞的电动势是分布于细胞的表层上，正电位与负电位是以很小的分子间层的距离而彼此分隔着。例如，神经细胞表面的平均电位为70毫伏，而正电位与负电位相隔的距离仅有0.005微米。如果将上述的电位差扩展在1厘米的距离上，将等于140000伏/1厘米（即0.07伏：0.000005毫米 = 140000伏/10毫米）。因此，在活细胞的表面上这些电位似乎很小，实际上是很巨大的电位差，要产生并维持如此巨大的电位差，需要活细胞作出巨大的功，并与细胞的物质代谢有极为密切的联系。因此，可以说明生物电在细胞的生命活动中起着何等重大的作用。

(三) 生物电源

电鱼用发放强大电流的方法进行捕食和防御的事实，引起人们很大的兴趣。对电鱼进行实验的工作在早期是比较粗略的，1838年法拉第（M. Faraday, 1847~1897）将电鱼放在水槽内，然后把手也伸在水中。手在水中的位置处于和电鱼不同的距离，刺激电鱼引起放电后，根据手在水中被电震跳起的高度，而画出电鱼放电时产生电场的强度图。1877年，巴布辛利用蛙类的神经肌肉标本来观察电鱼放电效应，他把蛙的神经放在鱼的电器官上，蛙的肌肉发生收缩运动达5分钟，痉挛的频率为4~5次/秒。此后人们用仪表测量了各种电鱼放电时的电压值，其结果是惊人的。例如电鳗体长2.5米放电电压可达600伏，电流强度不超过1安培，放电时能将水中与其相距不远的人和马击昏。生活在南美洲河流中的电鳗（*Gymnotus electricus*）身长仅92厘米，其放电电压可高达866伏。生活在非洲河流中的电鲶（*Malapterurus*）最大的体长为60厘米，放电电压为400~450伏。其中最大的一种电鱼是在北大西洋发现的电鳐，体重可达100公斤，它产生的电压值为60伏，电流强度有时可达50安培，其功率高达3千瓦，足以电死一条大鱼。目前已经知道的电鱼大约有500种，它们所以能放电，是由于体内有一种特殊的发电器官。

电鱼的发电器官是体内某些组织特化的结果，其来源因电鱼的种类不同而异。电鳐和电鳗的发电器官是由肌肉组成，电鲶的发电器官是由皮肤腺组成。虽然发电器官的来源不同，但各种电鱼发电器官的结构是相似的。它们是由多边形柱状体构成，长达数厘米，直径约3厘米，柱状体的横切

面似蜂窝状，各柱状体之间被结缔组织质板相互隔开。每一个柱状体又分成大量的小间，每个小间沿柱状体纵行排列，各个小间之间是结缔组织的隔板，小间的中间是电板，电板的厚度为7~40微米，并与隔板平行排列。在电板的两侧还有凝胶组织支持着电板（图18），实际上每个电板就是一个由肌肉细胞特化成的电化学细胞。这种特化的肌肉细胞在发生兴奋时不再发生收缩而是产生电流了。

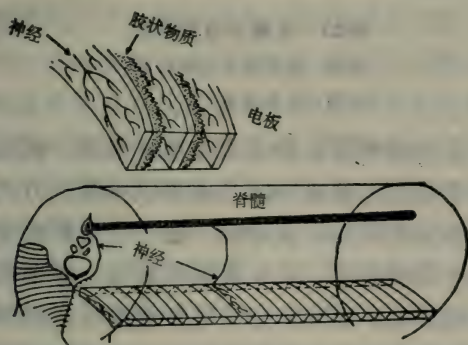


图18 电鳗体内电板的排列位置

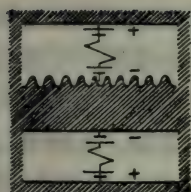


图19 电板模式图

放电持续时间约2.2毫秒。在安静状态时，电板两表面的电位是相等的，当放电时这种电变化只发生在电板有神经支配

电板一侧的膜是光滑的，接受神经支配，另一侧的膜有乳头状突起，没有神经支配（图19）。

采用微电极技术测定电鳗电板的膜电位为80~90毫伏，膜内为负。当电板放电时，即细胞兴奋时产生的动作电位达150毫伏，

的一面，表现为电位变负，而另一面的电位则不变（图20）。

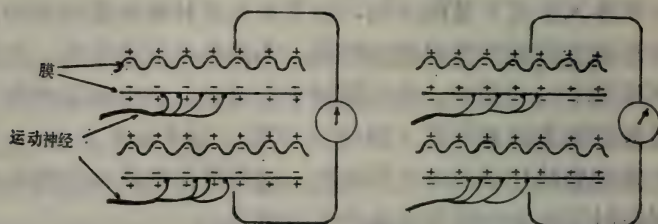


图20 电板放电原理图

左图：电板处于安静状态

右图：电板放电

每种电鱼的发电器官都含有大量的电板，例如电鳐发电器官的每一个柱状体就有1000个电板以串联的方式排列，有2000个柱状体以并联的方式排列。每一个电板都受到神经支配，当电鳐受到刺激时，发生反射性放电，各个电板几乎同时发生兴奋而放电。因此，每个电板放电时虽然仅有150毫伏，但获得的总电压即可达150伏，并产生强大的电流。各种电鱼由于电器官在体内分布的位置、电板数量及排列方式的不同，它们放电时电压数值和电流方向也不同。电鳐的发电器官分布在身体前部的鳃裂之间，电板总数有200万块。电鳐身体扁平，电器官内柱状体的排列与背腹方向垂直，电板的并联形式多于串联。因此放电时电压较小，但电流强度可达50安培，电流在体内流动方向是从腹部流向背部。电鳗电器官在体内的位置是沿着躯干的两侧排列，一直延伸至尾鳍部，由于鳗的体形纵长，电板排列串联多于并联，放电时电压值很大，而电流强度较小，不超过1安培。电器官内柱状体的排列方向与鱼体长轴方向一致，其体内电流方向是从尾

部流向头部。

从电鱼发电器官的结构可以看出，它就是由串联起来的电板组成了电池。而伏打最先设计出的电板堆恰好与电鱼发电器官的构造相似。所以伏打把他发明的伏打电池也称为人造电器官。

电鱼的放电器官不仅能产生高电压，而且在放电之后还能非常迅速地恢复放电能力。有人进行实验以测定发电器官持续放电的时间。以电鳐为材料，连续刺激可在15~30分钟内产生1000~2000次放电，然后发生耗竭。间隔15分钟后，电器官对刺激又可发生放电反应。如果将发电器官从体内切取下来，仍然可以放电1000次左右。可以看出，电鱼的发电器官是一种十分完善的发电装置，它工作得极其经济，而且能释放出大量电能而无明显的疲劳。如果按每克体重计算电器官输出电功率：电鳗为0.1瓦，而目前人造的铅蓄电池每克重只能输出0.001瓦的电功率，它仅是电鳗输出功率的百分之一。因此，电鱼的发电器官就是一台高效率的生物电池，它的工作特点不是连续的输出功率，而是以间歇的方式工作。其间歇输出的周期率又比较高，每秒内工作几个毫秒，如果人们能成功地模拟电鱼电器官在海水中发电的工作原理，并制出发电装置，必将为船只和潜艇开辟出新的动力。

如何利用动物电作为电源，代替其他方法来产生电，就成为一个引人注目的课题。在六十年代美国通用公司宇宙研究实验室以大鼠为对象进行了生物电应用的尝试，他们将一个电极植于大鼠前肢的皮下，另一个电极插入体腔，然后将导线连接到一个特制的500千赫的无线电发射机上，利用大鼠身上引出的电流可使无线电发射机连续工作八小时。另一

个较长时间的观察实验，使电极长期置于大鼠的身上，在六个月的时间内，大鼠的行为并未发生任何异常变化，说明大鼠已经习惯了电极的安装，而且实验初期和实验末期测定电流强度是相同的。因此可以推断动物电流在一个较长的时间内都可以加以利用。这个实验为无线电发射机提供了新电源，这种成功的尝试将为仿生学研究动物电力的应用开辟一个新的途径。

自从伏打第一次人工生产电以后，人类已经找到了许多方法来生产电。以伏打电池为雏型相应产生各种化学蓄电池。1831年学徒出身的法国人法拉第把磁铁绕电线运动时，发现电线中有电流通过。如果反过来，使电流通过电线就可使磁铁转动，这就是发电机和电动机的工作原理。至十九世纪以来由于电磁理论及电工技术的发展，为电力工业的发展开辟了广阔的前景。直流和交流发电机相继问世，一百多年以来特别是电磁感应发电机几乎统治了作为动力应用的全部电力来源。各种发电厂利用煤、可燃气体、液体燃料、核物质等发电，甚至可以把日光能转变成电能，但是这些产电的途径，没有一部发电机能够获取燃料中全部的热能。根据热力学定律，即使在理论上，机械发电机的效率也不能超过百分之五十。因此，把燃料转换成电的最高效率都受到限制，涡轮发电机的效率大约为百分之四十。还在电力史发展的初期，人们又开辟了另一种产生电的方法，即制造燃料电池。1839年英国人格罗夫（W. Grove）做出了第一个燃料电池的模型。燃料电池发电是将燃料的化学能直接变成电能的发电方法。燃料电池主要由燃料、氧化剂、电极和电解液四部分组成。燃料种类很多，有氢、甲醇、液氨、天然气等。氧

化剂一般用氧气、空气、或过氧化氢气等。电池的电极，正极也称“氧电极”，负极也称“燃料电极”，常用的电介质有氢氧化钾水溶液等。它一方面使燃料与氧化剂隔开，不使它们直接发生反应，另一方面它又使燃料和氧化剂分别在两个电极上同电介质一起进行电化学的“氧化-还原反应”，在反应中直接放出电子，从而产生电能。燃料电池不仅效率高，在经济上有很大的好处，而且不排出有害的气体。由于燃料电池没有运转的部分，所以不振动、也不易失火和爆炸。美国发射的“双子星座”和“阿波罗”宇宙飞船上都安装了燃料电池。

早在1911年，英国人波特（M. C. Potter）用酵母菌制成了一个生物燃料电池。它由两个容器组成，其中一个容器是由半透膜做成，装入活酵母菌和葡萄糖的混合液，把半透膜容器再放入一个较大的容器里，大容器盛以充有氧气的葡萄糖溶液，在大小容器内插入白金电极，在两电极间即产生电流（图21）。

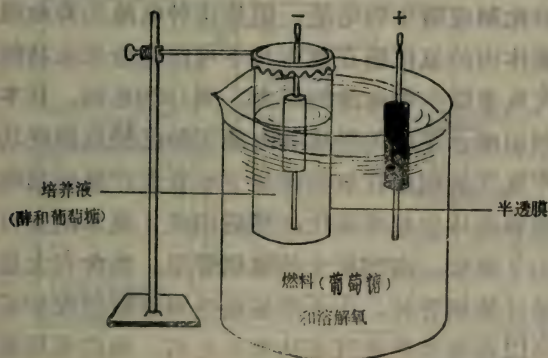


图21. 酵母菌燃料电池

波特认为：微生物分解葡萄糖时伴有电能的释放，这种放电的效应是微生物活动的表现，而电流的大小受到温度、培养液（葡萄糖）的浓度以及参加反应的活酵母数目所影响。波特将6个相同的酵母电池组成一个电路可以获得1.25微安的电流强度。生物电池的出现使工程师们认识到生物界存在着燃料电池的模型。由于从高等动物一直到微生物，在它们的生命活动中都存在着电子传递，而燃料电池就是利用氧化-还原过程从燃料中获取电子，然后通过外电路偿还电子。因此，模仿生物界的模型来设计生物燃料电池就成为可能做到的事了。到了二十世纪六十年代，已开始出现“虫子电池”，这是一种细菌燃料电池，其发电量可以用来供给小型收音机所需要的电源，而且还试制出由细菌、海水和有机物为燃料的生物电池。当时是由美国航空和航天局进行这项实验的，他们采用一种可以生产氢气的细菌，这种细菌体内含有一种氢化酶，在细菌吞食有机物后的代谢过程中可以放出氢气。氢气可以作为燃料电池的燃料，空气中的氧气可以作为氧化剂，由此制成微生物电池。但是这种电池的寿命很短，因为产氢菌体内的氢化酶在氧作用下可以完全失去功能。在日本也有人从事微生物电池的研究，到1979年初，日本东京工业大学利用废水发电的微生物电池实验已经取得成功。为了保护生产氢气的细菌在氧的作用下不丧失产氢的功能，他们采用琼脂将菌体包起来固化，然后切成4毫米的立方体，装入直径为2厘米、高25厘米的玻璃管里。当含有大量有机物的废水通过玻璃管时，由于产氢菌受到琼脂的保护不受氧的作用，可以连续生产氢气长达半年左右。他们采用的是酿酒厂的废水，含有大量的有机物。供给产氢菌食用后，换回

来的是氢气供给燃料电池发电。因此这种微生物电池既能发电，同时又能处理废水使之净化。这种电池获得的电量还很少，其电流强度为40毫安，还不能马上应用，但是利用微生物把废水中的有机物转化成电能则完全是废物利用。生物燃料电池可以把机体排泄的废物转变成电能以及净化水的效果已被从事宇宙航行研究的工程技术人员所重视。载人的宇宙飞船航行在太空之中，除了能获得日光外，它既不能得到任何东西，也不丢掉任何东西。宇宙航员是生活在一个闭合性的生态环境中，如果进行长时间的航行，例如有4个宇航员飞行几个月，他们所需要的食物、水和空气的重量和占用的空间是非常可观的，这对于宇宙飞船来说是一个难以克服的难题。面对这个现实问题，工程技术人员不得不向生物界寻求办法，确定建立“宇宙绿洲”的方案。所谓宇宙绿洲就是在飞船中建立一种物质转变的闭合循环。在这个循环中，使物质在转变中不断地被利用。例如使人体呼出的二氧化碳

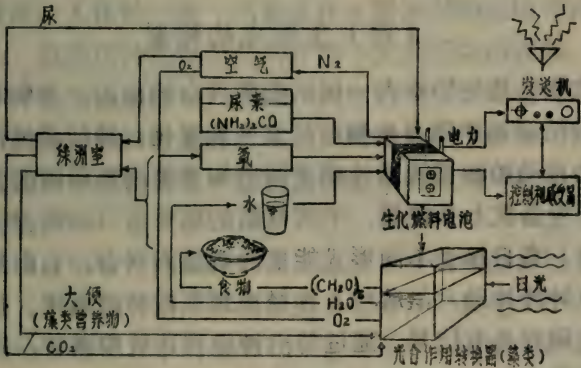


图22 闭合生态系统

再转变成氧气，排出的尿和粪再转变成可以利用的碳水化合物等。要实现“宇宙绿洲”内的物质循环，生物燃料电池是一个必不可少的环节。另一个装置是含有藻类的光合作用转换器。它们所形成的物质转换路径可以由图22表示：

宇宙飞船唯一可以得到的东西是永不缺少的日光，通过光合作用转换器，日光作用于藻类，把人体呼出的二氧化碳和一部分水转换成可以食用的碳水化合物，同时放出氧气。氧和尿素作为生物燃料电池的燃料，产生出电力用来通讯和控制宇宙飞船，电池净化淡水可供饮用，放出的氮气和氧气合成空气供给人体呼吸。因此在“宇宙绿洲”内的宇宙航行员呼出的二氧化碳和排出的粪便供给光合作用转换器，利用日光获得食物和氧气，排尿给燃料电池获得电力和饮水，就没有什么东西要丢掉而实现了物质循环再利用。这样一来，小小的绿洲利用日光能转换即可制造成人体所需要的能量和飞船使用的电能。

（四）生物电的控制

生物电是生物体内一切活细胞兴奋的标志。动物和人体的各种活动都伴随有生物电的发生和变化。神经系统作为机体内的自动控制系统通过感受器感知身体内外环境的各种变化，感受器犹如换能器，不同性质的感受器（如眼、耳、鼻、舌、身）各自接受不同形式能量的刺激而兴奋，它们都以电信号（神经冲动）沿着传入神经送到中枢神经系统。脑发出指令也同样是电信号，通过传出神经到达效应器官，完成与内外环境变化相适应的生理活动（例如：炎热的外环境或体温升高都导致汗腺活动增强；动物通过视觉、听觉或嗅觉发

现敌害后产生立即逃避的运动反应等)。根据信息论赋予信息的含义,即“信息就是事物存在的方式或运动的状态以及这种方式或状态的直接与间接的表达。”生物电的产生和运动就正是感受器接受外界刺激,表达事物存在的方式,因而生物电就是机体内传递的信息。大脑的生理功能就表现为对信息加工处理和发出指令(也是信息)的作用。

控制论的研究告诉我们,机器的自动控制系统和生物体内控制系统在信息传输、变换、处理和控制等一般规律中具有很大的共同性。机器的自动控制系统可以通过改变电信号的形式,按照某一程序驱动或调节着机器完成某一规格的动作。改变输入信号的程序,也就是改变电信号编码的形式,机器就可以完成不同的动作,得到不同规格的产品。而生物体内的电信号在大脑的控制下驱动着机体内的效应器官,完成一定规格的生理效应。我们身上每块肌肉的收缩活动都是在它的支配神经传来的电信号(神经冲动)驱动下产生收缩的。因此,人体的一举一动都是在大脑发出的电信号控制下进行的。肌肉在神经电信号的作用下发生兴奋而收缩,同时肌肉本身也发生电信号,称为“肌电信号”。生物电可以激活肌肉的活动,肌肉收缩时产生的肌电信号能不能输入机器的控制系统而操纵机器呢?这就为仿生学的应用开辟出一个诱人的前景。

利用肌电信号控制假手的活动就是生物电控制技术的一例:在五十年代后期,苏联制造了能工作的机电手。这种人造假手可以模仿人手的握紧和放松的动作。假手的活动是从操纵人员手臂上引出的肌电信号而启动的。假手活动的动力是电动机,它以安装在假肢中的电池为能源,在操纵人员的

前臂上戴着一个手镯式的电极固定圈，它使电极紧贴在皮肤上，分别引导出可使手指伸直和屈曲肌肉的肌电信号。这种直接引出的肌电信号是很微小的，它甚至比交流电网在人体上感应产生的50周交流信号还小一万倍，极易受到干扰，因此这种未经加工的肌电信号是不能发挥作用的。只有通过放大器加大电流的强度才能启动假手的电动机工作。其后在英国、意大利、美国也制造出由肌电信号控制的人造手。目前这种肌电控制的假手在我国已由上海假肢厂和上海生理研究所共同研制成功。他们采用两块圆形的银片电极、涂上导电性能良好的电极膏、贴敷在伸指肌和屈指肌外面的皮肤

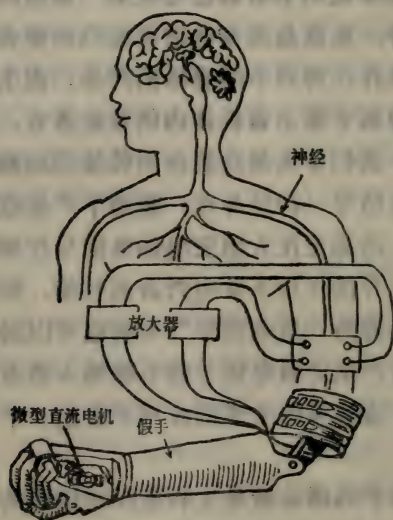


图23 肌电控制假手示意图

握力可达1公斤，提重力量可达10公斤（图23）。

根据肌电控制原理，还可以帮助瘫痪病人或在失重条件

上。引导出的肌电信号通过差动式放大器以消除50周交流信号的干扰，放大后的肌电信号控制一只微型直流电机，通过机械减速装置，带动假手的手指张开或握紧。残肢者通过训练，可以建立控制假手的意识，伸指肌收缩产生的肌电信号，使假手的手指张开。屈指肌收缩产生的肌电信号，使假手的手指握紧。其

下的飞行员活动。在美国开展关于肌电控制的研究，一方面是制造人造肢，例如制造肌电控制的人造臂，这是利用戴假臂患者肩部斜方肌的肌电信号，输入计算机来控制人造臂的活动。在一些患麻痹症而致残的人，例如在肩部和手之间损坏了神经通路的患者，从肩部肌肉引出肌电信号，经过放大器以后，再用来刺激前臂的肌肉引起手发生相应的活动。因此，这种装置实际



图24 生物电伺服控制器

上是电子桥梁，以健康肌肉的肌电信号来启动已经失去有效神经控制的肌肉。另一方面是把人和电子仪器偶合起来，用人的肌电信号来控制机械手臂的活动，帮助人完成一些艰巨的动作。例如宇宙航行人乘坐飞船重返地球大气层时，他们将处于超重的状态中，由于重力增加，使宇宙航行员的手脚很难移动，这时宇航员可以通过紧贴于胸部和臂部肌肉的金属箔电极，将肌电信号输入放大器，开动电动机控制机械手臂的活动以帮助宇宙航行员的手臂运动（图24）。

肌电控制技术应用的实际效果向人们展示了生物电控制技术的广阔前景。因为在人体内，任何随意动作的完成都是由大脑发出生物电信号控制有关的肌肉发生收缩而实现的。既然可以利用肌电信号成功地控制机械装置，那么直接利用大脑生物电来控制机械的可能性鼓舞着人们去实现这样一种有趣的情景：操纵者坐在电视机前，看着被自己脑电控制着的机械，只要操纵者脑子一想，被控制的机械就按着操纵者的意图进行工作。通过遥控，机械装置可以在人难以到达的地方在人的脑电指挥下完成人所应该做的一切事情。这将是人和机器最好的结合，它比单独的人或单独的机器都好。正是这种可以实现而又诱人的前景，使生物电控制技术成为仿生学中一个最鼓舞人和最有希望的分支。

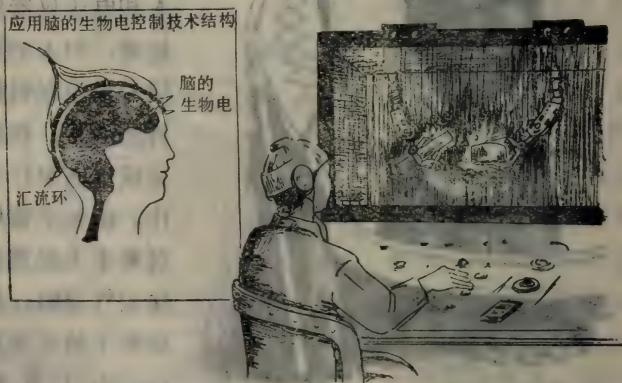
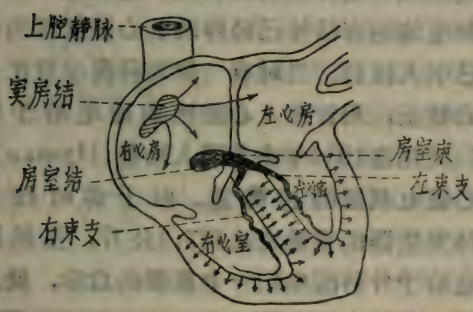


图25 利用大脑生物电直接控制技术设备的设想图

在生物体内各种器官接受发自中枢神经系统传出的信号的支配。由大脑发出的指令以电信号（神经冲动）控制着器官的活动，而大脑细胞活动又时刻接受来自感觉器官的电信

号，不断地调整其本身的活动状态（兴奋或抑制）或产生某种感觉（如视觉、听觉等）。因此人们也可以通过电子仪器产生电脉冲作用于生物体内，模拟生物电信号的生理效应。这种设想和实践对临床医学来说，可以达到治疗的效果。例如人工心脏起搏技术在临床上的应用就是近代电子仪器应用于医学上的一项重大成就。

心脏的功能类似于泵的作用，能自动地有节律地发生收缩和舒张以推动血管内血液的循环流动。在人的一生中，心脏一刻也不能停止搏动，而且心房收缩在前，心室收缩在后，才能使心脏有效地发挥血泵的作用。心房与心室按固定的程序，先后发生收缩与舒张是依赖于心房肌和心室肌发生兴奋的程序而协同收缩的结果。这种协调而有效的程序控制是通过心脏内一种特殊的心肌组织的活动而实现的。所谓特殊心肌组织是包括了窦房结（位于右心房）、结间束、房室交接区、房室束（希氏束）以及分支、浦氏纤维等，它们构成了心脏内的传导系统（图31）。窦房结的自动兴奋节律最高，



由此发出的兴奋冲动通过心房的传导组织可使左右心房的肌肉同时兴奋而收缩。通过结间束到达房室交接区的兴奋冲动在此处传导速度骤然减慢，然后再沿房室束及浦氏纤维使左右心

图26 心脏的传导系统

室肌肉被兴奋而同时发生收缩。

在正常情况下心脏窦房结兴奋的节律性最高，心脏各部分的兴奋节律都是在窦房结的节律控制之下。由于兴奋冲动到达房室交换区出现的时间延搁，恰好使心房肌先发生兴奋而收缩。当心房开始舒张时，心室肌才被激动而收缩。因此，正常时窦房结就是心脏的起搏点。中枢神经系统通过交感神经和副交感神经对心脏的双重支配，发出电信号（神经冲动）调整窦房结的兴奋节律，影响心脏搏动的频率（心率），当然由窦房结发出的兴奋冲动也是以电信号的形式来启动心肌的收缩。

临床上有些心脏病人，可因为窦房结功能障碍不能起搏或者心内传导系统传导冲动的功能发生故障，出现严重的心律失常，使心室的收缩活动与心房的的活动脱节，最终都导致心脏射血功能低下，致使重要的脏器供血不足，特别是大脑缺血而出现一系列严重后果，甚至有致命危险。在这种情况下，用人工的方法，给予心脏一定形式的脉冲电流，刺激心肌，可使心肌按一定的频率进行有效的收缩，这就是人工心脏起搏术。利用外加电流的方法使已经停跳的心脏复活的事实，早在1929年就已引人注目。当时有一位外科医生曾在一个已经停搏的婴儿心脏上，用针插入心脏然后通电给予刺激，竟使心跳复活了。此后在1939年由美国人哈曼(Hyman)设计了第一台用于心脏电刺激的起搏器。由于那时技术水平所限，制成脉冲发生器的重量竟达到7.2公斤，虽然还不适合于临床，但是给予外科医生们一个重要的启示，就是采用人工的方法，用一个较大的电极，发出脉冲电流能可靠的刺激心脏。但是直到1952年由佐尔(Zoll)使用两个电极

板安置在病人胸壁外面，以闸流管刺激器输出单相直流脉冲来电击已经停跳的心脏获得成功时，在临床心脏病学领域内，才开始向着电治疗迈开了第一步。二十多年来通过临床实践不断改进起搏器、导线及电极的固定位置，使心脏起搏术有了很大的提高。目前常用的起搏方法分为临时起搏和永久起搏两大类，根据病人情况而定。电极的安放途径多采用静脉导管法。在 X 线透视和心电图的监护下，将带电极的导管从颈外静脉或下肢的大隐静脉插入直达右心室内，使导管的尖端接触到心室壁，即可对心室肌发生刺激而起搏。起搏器发出可以调节频率的电脉冲，通过导线和电极刺激心肌，通常应用的起搏刺激强度约为 5 毫安，时间为 2 毫秒。对于临时起搏术，起搏器一般放在体外，导线经皮肤切口与起搏器



联接；对于永久起搏术来说，则把起搏器埋藏在锁骨下、腋下或上腹部的皮下组织中。这种方法既可避免感染、又安全，也方便于病人。我国生产的埋藏式心脏起搏器，采用集成电路，其体积相当于半个火柴盒的大小，重量仅有 93 克（图 27）。

人工心脏起搏术就是模拟生物电流对心肌细胞的刺激，可以使已丧失产生或传导电信号障碍的心肌维持正常活动。这种医疗方法使心脏病的死

亡率减少，过去心源性脑缺血综合症的死亡率为 50%，应用人工心脏起搏术以来，死亡率已下降到 15%。目前世界上带有心脏起搏器的人数据不完全统计

也已达到几十万人之多。

此外，“电击除颤”又为医生治疗心脏病增加了新的方法。有一些心脏病病人，如风湿性心脏病、冠心病等，由于心肌纤维长期的显著地增厚或纤维化，即失去有效的收缩功能。心肌纤维存在许多病理兴奋灶，使心脏的搏动很不规律，甚至造成颤动。心房颤动可使心房的跳动达到每分300~600次，显然这种颤动就使心房停止有效的收缩，心室内血量的充盈不完全，心室射出的血量也减少。如果心室肌颤动，后果更为严重，心室不能有效射血，必将危及生命、需要进行抢救。“电击除颤”就是在病人胸外应用直流电电击，在极短促的时间内，释放高能电流（300~400瓦秒），这样的电流通过心脏时可消除心肌纤维的病理兴奋灶，使所有的心肌同时活动，恢复窦性心律。

在施行电击时，用两块被盐水浸湿的纱布包绕的金属电极板，放在病人的胸壁上，由直流电除颤器供给高能直流电。通电时病人震动一下好似前胸受到一拳之击，心室的颤动即刻消失。对心房颤动的病人施行电击时，是由病人自身心电图中的R波来触发除颤器放电，使电击的时刻恰好落在心室收缩期内，这样对心室不发生影响（心肌在收缩时，对于任何强度的电刺激也不发生反应）。这就是所谓“同步电击”，采用这种方法安全、有效、迅速、简便，副作用也少，电击后病人的心律转为正常心律。目前国内外报导：同步电击转律的有效率可达到80~90%。因此电击除颤不仅可用于抢救病危的心室颤动病人，也可以用来治疗心房颤动、心房扑动、室上性心动过速及室性心动过速等严重的心律失常，为治疗心脏病开辟了一条新路。

模拟生物电流刺激术还应用于其他方面。苏联研究睡眠时大脑细胞电活动的特点，制成了一种治疗用的电睡眠器。它的工作原理就是以一定形式的脉冲电流影响大脑皮层，引起神经细胞的抑制，使人进入睡眠状态。这种睡眠机可以使人很安静的进行“夜间睡眠”1~2小时（图28）。



图28 电睡眠器

此外，脑的电刺激术还可用来治疗精神病。早期这种治疗方法过于简单，采用较强的电流，瞬间电击大脑，以消除精神病患者大脑皮层内的惰性病理兴奋灶。这种治疗方法使病人感到恐惧和痛苦，愈后可能对记忆力也有一定的影响。现在已经改进为由程序装置控制的无线电来传送电刺激，再配合轻便的电源可供患者随身携带。这种脑的电刺激术可希望能提高对精神病的治疗效果。对于增进正常人的智力也许会有所帮助。

目前国外正在研究的还有电刺激视神经和听神经的方

法，可以使盲人和失听的患者重新获得视觉和听觉。对我国特有的针灸和针刺麻醉治疗手段，通以电脉冲代替手捻，可以获得较好的疗效。这充分显示了外加电脉冲对于调整肌体各器官的生理功能和改变中枢神经系统机能状态的效果。总之，以模拟生物体内电信号的生理效应，以外加的人工电脉冲刺激术的应用也属于生物电控制技术的一个重要方面。属于这种类型的仿生学就是生物学与工程技术学之间最有成效的结合，而这个工程就是人类本身。它不仅在医学上发挥治疗疾病的作用，而且对于认识人类本身也有很大的促进作用。



三、电子技术与仿生

电子学是研究电子和电磁场运动、电路理论、信息传输系统的一般规律及其应用的科学。从电子学的发展趋势来看，创造新的电子元件、电子器件以及研究电路理论(网络理论)和电路技术都是电子学研究的重要方向之一。由于目前自动化技术的迅速发展和空间科学的发展向电子学提出了更高的要求，要求电子学能提供更高质量的电子元件、器件和设备，在电路设计中要求更加精确、可靠和具有自适应性的特点。要达到这些要求，一方面依靠于电子学基础理论的研究，另一方面要与生物科学相结合，开辟电子仿生学的途径。回顾电子学的发展进程，仿生学为电子学的发展提供了不少新思想、新概念，生物界向电子学展现出小巧可靠的电子元件，结构严整的线路，高功率低消耗的设计原理以及对外界感受敏锐的感觉器官等，十分引人入胜。仿生学研究生物体的各种复杂生理功能，包括信息的产生、转换、传导和综合；对刺激反应的协调控制；学习、记忆和自适应能力等，对于这些课题的深入研究为电子学的进一步发展提供宝贵的资料和丰富的设计思想。因此，电子学既扎根于物理学和数学，又向生物学吸取营养，并用电子学方法去模拟生物的功能，创造出新的电子设备，是电子学发展趋势中的一个重要方面。

(一) 神经元的模拟

神经元也就是神经细胞，它是神经系统的结构单位也是功能单位。人的神经系统中包括有一百亿个以上的神经元，它们在体内形成神经网络，通过感觉器官和感觉神经（传入神经）接受来自身体内外的各种信息，传递至中枢神经系统内，经过对信息的分析和综合，再通过运动神经（传出神经）发出控制信息，以此实现机体与内外环境的联系，协调全身的各种机能活动。如果把整个神经系统比喻成一部复杂的自动控制系统，那么神经元就犹如这部控制装置中的一个元件。

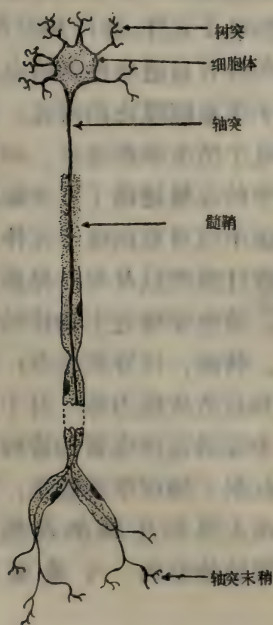


图29 典型的神经元

然而，神经元也是要发生功能障碍的，在人的一生中平均每小时约有一千个神经元发生毛病，而人脑仍能保持着正常的思维活动。但是，如果按现有的电子技术水平安装一台有一百亿个电子管的仪器，那么平均工作一秒钟就要有几千个电子管损坏。可想而知，这样的仪器要保持连续工作是根本不可能的。目前电子器件还远没有达到象神经元那样高度的可靠性。由于神经元之间巧妙的网络联系，当神经元的功能发生故障时，神经系统表现了惊人的“自我修复”的能力，保证整个神经系统的工作正常。因此

开展对神经元的结构和功能的研究，模拟制造象神经元那样小巧、灵敏、可靠的技术元件模型，将为现代电子技术提供性能优异的新元件。

神经元也和其他类型的细胞一样，包括有细胞膜、细胞质和细胞核。但是神经细胞的形态比较特殊，具有许多突起。因此又分成细胞体、轴突和树突三部分（图29）。

细胞体是神经元的主体部分，是产生兴奋（信息）的原发点。神经元兴奋时，神经膜上产生的电位变化称为动作电位。在神经细胞外记录时，动作电位是一个负电变化的脉冲信号。轴突是神经细胞体向外伸出的突起，它的形态特点是细而长，形成纤细的神经纤维。人的各种神经纤维直径只有1~20微米。在轴突的外面包裹着一层称为髓鞘的绝缘物质，使神经纤维犹如导线一样，由细胞体产生的动作电位相当于脉冲信号沿着神经纤维传导。由成千上万的神经纤维组成肉眼可见的白色神经干，这样的神经干就好似是一根多股的电话线，其中每根神经纤维都仅能传递自己神经细胞体所产生的信号，各神经纤维所传递的信息彼此之间互不干扰。神经元所产生的兴奋冲动依靠轴突传递给其他神经元或效应器。

神经元的树突短而粗，并有多分支呈树枝状而得名。它和来自其他神经元的轴突末梢相接触。神经细胞体也接受其他神经元的轴突末梢。一般情况下，来自别的神经元的轴突末梢到达细胞体处，在此发生的神经冲动传递，对该神经元起兴奋作用，使细胞体放电（兴奋）。产生动作电位沿着它的轴突继续传导出去。如果来自其他神经元的冲动到达该神经元的树突处，冲动的传递只能影响该神经元的兴奋性的水平，

并不能有效地导致细胞体放电（图30）。此外，还有一些神经元的轴突到达细胞体，对于该神经元发生抑制性作用，使细胞体的兴奋性下降，使细胞体不易放电或停止放电。如此

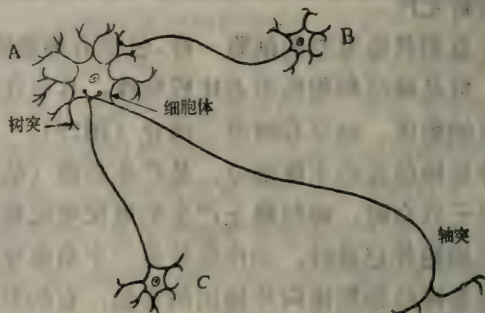


图30 神经细胞之间的联系

C神经元的轴突与A神经元细胞体接触

B神经元的轴突与A神经元的树突接触

多样性的联系使神经元上好似备有正负两种控制装置。神经元根据接到的不同信号巧妙地进行信号加工处理，最后合成该神经元的兴奋性水平。各个神经元通过轴突和树突互相联系形成了各种形式的神经网络，犹如各种形式的电路，如负反馈、正反馈、时间综合、空间放大、闭锁式振荡等，再组成集成电路（图31）。

引起神经元的活动需要有一定的刺激强度，能够引起神经元发生兴奋所需要的最低刺激强度称为阈值。可以用阈值的大小来表示某个神经元的兴奋性水平，阈值小表明兴奋性水平高，反之亦然。那么神经元的兴奋性水平与什么因素有关呢？神经细胞在安静状态时，在细胞膜内外之间有一个电位差，称为膜电位或静息电位，一般有70~90毫伏。细胞膜

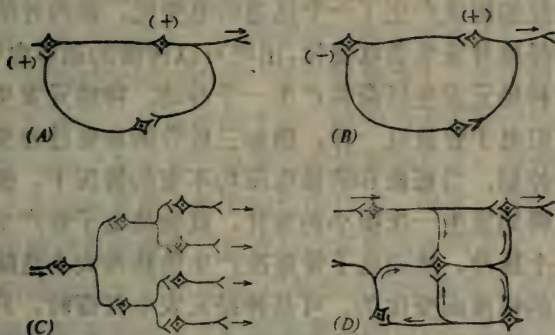


图31 神经网络的形式

→ 神经冲动传导方向

(-) 为抑制性作用

(+) 为兴奋性作用

(A) 负反馈网络

(B) 正反馈网络

(C) 空间放大网络

(D) 闭锁式振荡网络

内为负，细胞膜外为正，膜处于一种极化状态。膜极化状态的改变就会影响神经细胞兴奋性的高低，如果来自其他神经元的冲动到达细胞体上，引起神经膜的极化状态减小，即膜内外的电位差(静息电位)减小，神经细胞的兴奋性就升高。这种使膜的极化状态减小的影响称为去极化作用。相反，如果外来的神经冲动使神经膜的极化状态加大，膜电位加大，神经细胞的兴奋性降低，这种抑制性影响称为超极化作用。因此，在静息状态时，神经细胞膜电位的大小决定着神经元兴奋性水平。

当兴奋性升高，膜电位减少到某一临界数值(阈电位)

时，神经细胞就产生了一个迅速的电变化，膜内外的极性倒转、神经膜外发生负电变化，出现可以传播的动作电位，这就标志着神经元发生兴奋并产生一个冲动。神经元发生兴奋的过程好似电子管放电一样，例如三极管的放电过程受到栅极电压的控制，当板极和阴极电压均不变的情况下，栅极电压只要在瞬间发生一次很小的变化，就会使电子管产生板流，发放一个脉冲。然而电子管每次产生的脉冲大小是随栅极电压改变的幅度而变化的。可是神经元发生兴奋时，只要外来刺激达到阈值以上，不论刺激强度如何，一律引起细胞膜产生最大的电位变化。也就是说，它们所产生的动作电位幅度都是相同的，而且沿神经纤维传导时，动作电位的幅度也不会因传导距离的延长而衰减。当然，当刺激强度在阈值以下时，虽然膜电位稍有变化，处于局部的去极化状态，但是由于膜电位的减少没有达到阈电位的水平，因此也就不产生动作电位，只是兴奋性稍有提高而已。这样，神经元对外界刺激的反应表现了“全或无”的特征，而且在传导冲动时又是非衰减性的。在传导冲动时所消耗的能量来源于神经元本身的代谢活动所供给。神经冲动在神经纤维上的传导也和导线一样，可以是双向性的，但是在神经元之间，神经冲动的传递则是单向性的。即冲动只能从一个神经元的轴突传递给另一个神经元的树突，细胞体或轴突。

神经元的这些活动特征为电子元件的研制提供了很好的生物原型。例如电子计算机的基本元件是电子管或晶体管，计算机的工作是以电脉冲形式进行的，而且采用的是二进制，以有无电压的方式来表示。有脉冲代表“1”，无脉冲代表“0”。在电子计算机中电子管以通电或断电来传递电脉冲

“1”或“0”，脉冲在电子管中是单方向传导的。而在神经元活动时，其“全或无”的特征使它的反应也具有“数字”的特征，即神经元反应中的“全”就相当于二进位制中有脉冲的“1”，神经元反应中的“无”就相当于无脉冲的“0”。所以神经元的“全或无”也是二进位制的方式，而神经冲动在神经元之间也是属于单方向性的传递。因此，神经元与电子管在传递信息的特点方面进行比较确有共同之处。但是神经元的活动远比电子管可靠，以神经元为生物原型进行模拟，对于研制高质量的电子元件将有很大的启示。从仿生学的角度来看，对神经元的模拟从两个方面进行。一方面是从结构和功能上对神经元的同时模拟，制作出在结构与功能上与神经元近似的实物模型，这类工作主要是用电子模型来做的。另一方面主要是从神经元的功能出发进行模拟，其中也包括对神经网络功能的模拟。

目前人们已用电子管、半导体等研制作出多种人工神经纤维和人工神经元作为自动控制装置的新元件。人造神经元的模型很多，以下简介一种由4个晶体管组成的模型(图32)。

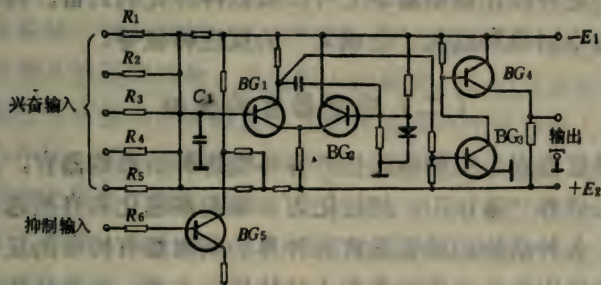


图32 人工神经元

由晶体管 BG_1 和 BG_2 构成单稳多谐振荡器，在模型中由晶体管 BG_1 的基极与发射极之间的电压来模拟神经元的兴奋阈值，如果输入一旦超过此阈电压，多谐振荡器即产生脉冲，相当于神经元兴奋时产生的冲动。脉冲转入由晶体管 BG_3 构成的放大器，而后再输给射极输出器(BG_4)以提高神经元模型的负载能力。

模型可以接受兴奋性或抑制性两种信号，兴奋性的输入信号可通过5个输入端进入多谐振荡器。在5个输入端，由电阻 R_1-R_5 与电容 C_1 一起形成积分电路，借助这个线路对于进入模型的兴奋性信号进行时间和空间总和。在神经元上，来自抑制性神经元的冲动对该神经元的作用是使膜电位加大，而造成兴奋性下降。一个神经元兴奋性的水平最后决定于兴奋性和抑制性冲动综合的结果。在模型上所谓抑制性输入端是要通过由晶体管 BG_5 形成的反相器，将电信号加入多谐振荡器的输入端，来模拟抑制性冲动对神经元的作用。在模型中多谐振荡器输入端接受信号的最终极即决定于该模型的兴奋性输入端与抑制性输入端相反信号的综合结果。

上述神经元模型基本上可以模拟神经元的兴奋、抑制、时间与空间总和以及“全或无”的反应特征等。

(二) 感觉器官的模拟

感觉器官是生物体接受外界环境各种信息的器官，并依靠它与外界“通讯”。经过亿万年来长期进化和自然选择的结果，各种动物的感觉器官对外界的刺激都有特殊的反应，而且表现出极高的灵敏度和十分特异的本领。这些往往为人类的感觉器官所不及。地震前不少种类动物表现出的各种

前兆反应就可以说明这一点。有些鱼可以嗅出水中浓度只有 1×10^{-11} 毫克/升的物质；另一些鱼可以觉察到梯度为 0.003 微伏/毫米的电场强度变化；响尾蛇的温度感受器是一个热敏器官，它可以测出在 0.1 秒内增加或减少 10^{-11} 卡的热量，即相当于可察觉出摄氏千分之一度的温度变化等。对于动物感觉器官的研究和模拟，将为人们提供许多新的设计思想，改善现有的计算机和自动机的输入装置，创造出性能优异的技术部件。此外，对感觉器官进行结构与功能的模拟，制造出近似的生物模型，还可为人补装丧失的感觉器官开辟新的途径。

关于听觉器官。早在一百多年前就有人发现，蝙蝠能在完全黑暗中飞行，可以捕捉空中的小虫，也能灵活地躲开障碍物。人们一定会惊叹蝙蝠真有好眼力，其实它的视力很差，即使是瞎眼的蝙蝠也一样正常的飞行和寻食，但是，如果将蝙蝠的双耳堵塞，它们就很难捕食，而且不能避开障碍物，还易于彼此碰撞。说明失去听力的蝙蝠在黑暗中是完全无能的。所以，可以判断蝙蝠在空中能运动自如，不是靠眼力而是靠听力。当然到了二十世纪四十年代以后，人们已经清楚地了解蝙蝠的喉头能够发出超声波，并且通过回声的方法来捕捉食物和躲避障碍物。通过深入的研究，人们发现蝙蝠对回声的收听有极高的灵敏度，它在环境噪声比信号强大两千倍条件下，还能检测出从蚊子身上返回来的声波。可见蝙蝠的回声定位器在测距精度、角分辨率和抗干扰方面都不比现代雷达逊色，而且启发人们模拟蝙蝠的听觉器官而仿制出雷达的抗干扰装置。

有人对在夜间捕食昆虫的某些种类的蝙蝠进行研究，剖



图33 研究蝙蝠的听觉器官,启发人们
仿制出雷达的抗干扰装置

析它们的头骨、颞骨和耳蜗,尤其对耳蜗的精细结构进行了详细的研究。这一类蝙蝠的外耳很大,并且可以向各个方向转动,内耳特别发达,按体积与头骨的比例都比一般的哺乳动物为大,两个耳蜗之大几乎可在头骨的中线处相会,占头骨后室的大部分。从耳蜗的内部构造来看,它的基底膜很短,螺旋形的韧带极其发达,在临近鼓阶处还有一个附加的骨质薄板,称为外螺旋板。这样结构的特点适合接受频率很高的声音和低密度的回声。此外,蝙蝠还可以借助于两耳的随意运动来测定目的物的方向和可能的距离。

既然蝙蝠是借助于听觉的回声定位方法判断食物与障碍物的方向和距离,那么也可以为盲人提供一个“认物”的工具。人们研究蝙蝠的超声定位器后,为盲人仿制了一种象声纳的新仪器,把它安装在眼镜上(图34),以电池为能源,可以发射超声波并且接受回波。仪器的电路把超声波转变成能听到的低频率,使用人从眼镜架上小耳机里就能听到回声。这种仪器包括一个微型的超声波发射器及位于两侧的呈盘状的



图34 盲人超声眼镜

传声器来接收回声，分别把回声信号传给两耳。它的探测范围约在6米以内，一个物体只要在它的有效范围内，发射器就造成连续的回声。由于左右传声器回收信号的强弱不同。盲人就可以知道发生回声的物体的方向。蝙蝠根据回声信号可以把昆虫反射的信号与地表、树林、灌丛的反射信号区分开，盲人也可以根据回声音调的强弱区别他所探知物质的

性质。例如：他们描述枝叶茂盛的灌木丛的回声是软绵绵的，而一扇玻璃门的回声是清脆的。通过回声盲人可以分得清前面的物体是挡风墙还是栅栏。总之，这种声纳式的仪器可以为盲人引路，正与蝙蝠利用回声定位的导航相似。用这种声纳装置甚至可以训练八个月的天生盲童用听觉来“看”东西。

研究有关人类听觉的模拟问题，其最终目的是为了使机器识别人类的语言。语言是人类所独有的信号系统，人类通过语言沟通思想和感情。语言作为一种声音信号被机器感知，使机器按语言信号的含意而工作，这样一来就是通过声音把人的机能和各种控制系统如电子计算机等偶合起来，这在电子技术领域中将会发挥重大的作用。为达此目的，人们已发明一种模拟人耳电子模型，对声音信号可以包括音频、

声音振幅和持续时间等参数作为其输出。根据对豚鼠的神经生理学实验中所观察到的听神经元的特征而模拟人造神经元，已研制出能识别10~50个词的语言声音感受器，把它直接用于机器上，就是声音控制器，应用于宇宙飞船上，它可以接受三个不同讲话者发出的14个命令。例如命令“停止”、“向前”、“向后”、“向左”、“向右”、“向上”、“向下”、“握紧”、“松开”、“扔掉”等。宇宙飞行员只要说出如上的口语命令，就可以通过声音控制器来操纵飞船，这样就解放了宇宙飞行员的双手，而有可能去进行搬运货物、维修、保养和安装等操作，尤其是在失重的条件下，宇宙飞行员的肢体运动极为困难，通过语言命令就可以操纵飞船的正常航行。目前这种声音控制器也应用于控制机器、操纵人员通过声音发射机用语言命令可以同时控制多台机器的同步性活动，这样既减少机器操纵者的人数，也减轻体力劳动。

此外，目前有很多国家还从事人工耳的研究，恢复由于听神经局部损坏患者的听力。“人工耳”是一个特殊的装置，包括与听神经相接的接受器以及传送器，将它植入脑中，传送器固定在耳后，由具有8个频率的声音振荡器将声音传给传送器，后者再把信号发给接受器，信号在接受器转变成脉冲，产生的脉冲对听神经起作用，在脑中形成音响印象。

关于嗅觉器官。嗅觉在动物的生活中占有重要的地位，它们依靠嗅觉躲避敌害，寻食，在生殖季节还依靠嗅觉寻求偶，因此一般动物都有比较灵敏的嗅觉。人们都熟知的狗就是以嗅觉的灵敏而著称。狗的嗅觉比人灵敏一百万倍，它能感觉到百万种物质和不同浓度的气味，有人计算在1立方厘米的空气中含有268亿亿个气体分子(268×10^{18})，其中只

要有9000个油酸分子狗就能嗅出味来，说明狗的嗅觉灵敏度可达到单个分子水平。狗由于有灵敏的嗅觉而成为人类得力的助手，除了担任发现、搜索和跟踪的活动而用于狩猎和公安部门外，还训练狗查找煤气和其他工业气体管道的漏气处，甚至用于探矿。狗根据地下矿物的气味可以找到埋藏在地下12米深的硫铁矿和汞矿。然而，在动物界嗅觉最灵敏的还不是狗的鼻子，而是昆虫的触角。昆虫的触角就是它的嗅觉器官，往往只有几节简单的结构，但是只要保留下一个嗅节、就仍有嗅觉能力。而且嗅觉是昆虫进行彼此“通讯”的重要手段之一。

在动物个体之间进行信息交换的方式包括视觉、听觉、

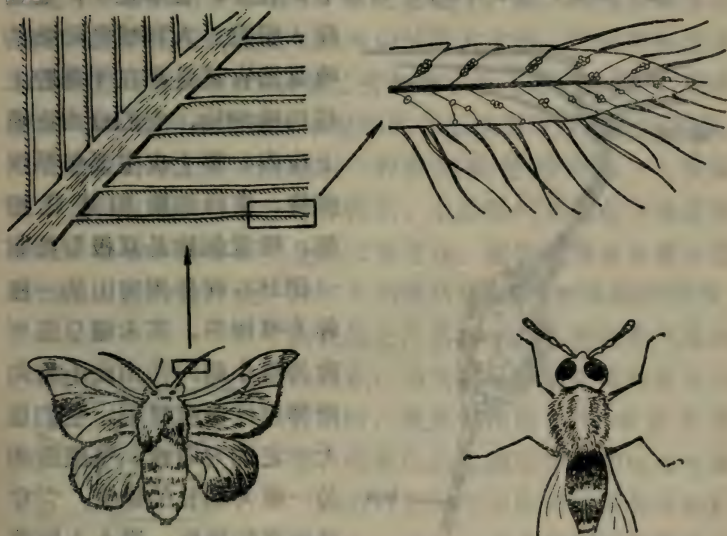


图35 昆虫的嗅觉器官

嗅觉等多种方式。但是昆虫是以释放化学物质通过嗅觉器官引起反应，这种以嗅觉作为沟通消息的方式比视觉和听觉更为重要。这种借助于气味物质作为信息传递方式可称为化学通信，昆虫所释放的可传导信息的介质称为信息素。昆虫以信息素为基础形成的通讯系统，在它们的生活和行为（包括寻食、保卫、生殖、筑巢、育幼）中起着重要的控制和协调作用。当一个雌蛾仅仅分泌出0.1微克的性诱物质，竟能招引相距几千米以外的雄蛾来相会。如此微量的物质，传播如此远的距离，几乎是只有一个物质分子作用于雄蛾触角上的嗅觉感受器，但这就足够引起雄蛾对此引诱物质的感受，循味而来，可见昆虫的嗅觉灵敏度是何等的惊人！

关于嗅觉产生的机理，目前看法较多，也未统一，还要

深入研究。人和哺乳动物的嗅觉器官就是存在于鼻腔上端的嗅细胞，它们分布在嗅上皮内。嗅上皮主要包括嗅细胞、支持细胞和基底细胞，嗅觉细胞是双极型细胞（图36），向外周突出的一极称为嗅树突，其末端呈圆形称为嗅小胞，并由此小胞向外伸出许多嗅纤毛，它们也无一定的方向性。嗅细胞的另一极为细长的轴突，它穿过头骨的筛板，进入大脑前方的嗅球。由嗅球内的第二



图36 嗅细胞（双极细胞）

级神经元发出的轴突组成嗅神经进入大脑的嗅觉中枢。当外界的气味物质分子作用于嗅细胞时，可以在嗅上皮引导出电位变化，而且随着气味物质的浓度增加对嗅细胞的刺激强度加大，所产生的电位变化也加大。

有人研究了苍蝇触角上的嗅觉感受器，它是一个可与外界相通的小腔，在小腔内含有成百个嗅觉神经元，其树突伸向小腔内，人们在苍蝇头部神经节内插入微电极，当气味物质分子作用于触角时，就可在神经节引出电位变化，采用不同的有味物质刺激触角，其电位变化的频率和振幅也有改变。初期人们就是用活苍蝇来作为生物探头，把苍蝇头部神经节内引导出的电变化经过放大器后，把电讯号输入到分析器内，引起分析器发出警报信号。在此基础上，深入研究苍蝇嗅觉器官内化学反应转变成电脉冲信号的方式后，已经研制出灵敏的小型气体分析仪，目前已安装在宇宙飞船的座舱内，用来监测气体，也用来监测潜水艇和矿井里的毒气及时发出警报。

我国科学工作者研制出一种模拟嗅觉的仪器——嗅敏仪。这种仪器由嗅敏半导体探头、电动吸气泵和电子线路所组成。嗅敏半导体探头是由二氧化锡、氯化钨等成分混合烧结而成。这种元件是一种多孔的烧结体，由于粉末颗粒极细、

因此使元件具有相当大的吸附气体的表面积，当气体分子被元件颗粒表面吸附时，就使元件的电导率发生改变。嗅敏仪的检测部分采用电桥电路（图37），将其半导体元件作为电桥的桥臂之一（S），当半导体元件探头遇到气体时，元件电阻发生明显改变，

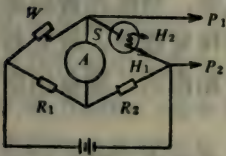


图37 嗅敏仪电路

电桥失去平衡，从电表(A)上可表明被测气体浓度的相对大小，并且可以通过光、声报警。为了避免外界气流的干扰，模拟鼻腔的作用，把嗅敏半导体元件安装在电动吸气泵内，提高了嗅敏仪的工作效能。当气体消散后，探头内的嗅敏元件的电阻迅速复原，即可以再次使用。经过实验证明：嗅敏仪可以嗅出40种气体，包括人鼻不能嗅知的一氧化碳。而且对许多气体非常灵敏，例如对于浓度为百万分之一的氢气也可以嗅出。采用嗅敏仪可以检查煤气管及化工部门易燃易爆，有毒气体管道是否漏气，甚至对埋在地下半米深的煤气管的漏气部位，也可以被嗅敏仪查出。

此外，人们还研制了一种代替警犬的电子仪器，它的主要部件是紫外灯和对紫外线有灵敏反应的检测器。把紫外灯发射出的射线聚焦在检测器上，由于不同物质气体进入紫外灯与检测器之间时，它可以部分地吸收紫外线的辐射能，减少了检测器所接受的能量，导致检测器内部参数的改变而发出警报。这种电子仪器可以监测的物质如苯、染料、漆、氨、树脂、瓦斯、酸以及新鲜的苹果和香蕉等气味，被测气体的浓度仅有千万分之一时，即可被测出，其灵敏度已达到狗的嗅觉水平。因此，这种电子仪器有“电子警犬”之称。它可以应用于手术室、仓库、汽油库和化工厂进行气味检测。

关于视觉器官。视觉器官是构造复杂、功能完善的感觉器官。人的眼睛又是生物界中最完善的视觉器官。研究和模拟人和动物的眼睛，将为各种探测装置如雷达、图象识别和自动控制装置提供灵巧的生物模型。

眼的结构包括折光系统和感光系统两部分。眼的折光系统是一个复杂的光学系统，外界光线进入眼内要通过角膜、

房水、晶状体和玻璃体四个透明物质到达视网膜，但是它们的折射率和曲率均不相同。

虽然外界物体在眼内成象的过程符合物理学中凸透镜成象的基本原理，但是眼对光的折射过程却比简单的凸透镜要复杂得多。眼睛可在不移动的情况下随意了望远处的景物也可仔细辨认近物。眼的这种调节能力，在不同的动物中各有

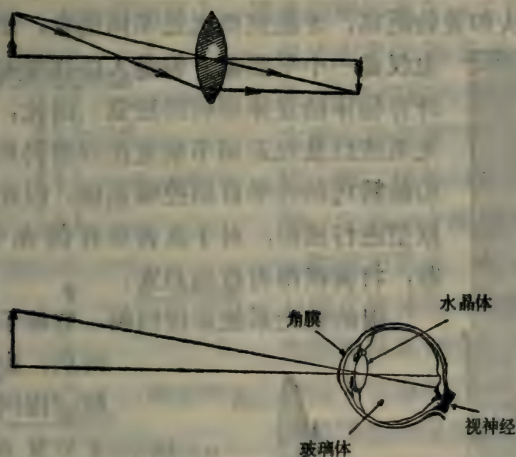


图38 眼内成象原理

不同的调节途径。鸟类是通过改变角膜的曲率，软体动物是改变眼轴的长短；鱼类则是通过改变晶状体的位置。这些调节方式都有一定的局限性。人和哺乳动物的视觉调节则包括了晶状体曲率的改变，瞳孔的调节和双眼视轴交叉等三个复杂的调节活动。其中晶状体曲率的改变是主要的因素。人和哺乳动物的晶状体是一个富有弹性的透明组织，当晶状体的曲率改变时，光的折射率也发生改变，晶状体的曲率完全受到神经系统的反射性控制。当眼睛观看近物时，晶状体变凸，

折射率加大，仍然确保成象在视网膜上，与此同时，瞳孔缩小可以排除散射光的干扰，两眼的视轴向中（鼻侧）交汇，集于近物上，保证双眼视网膜成相称部位，以形成清晰的视觉。如此复杂的视觉调节完全是在神经系统参与下进行自动的反射性调节。现有的照相机、摄影机和其它录象设备，其光学部分一镜头的曲率是固定不变的，人们只有通过不断地改变镜头和景物距离，才能获得远近不同的象，而且获得的也仅是一个平面象。但是人的视觉却可以获得外界物体的立体形状的感觉。因此，人眼的折光系统以及视近调节装置在目前仍然是最完善和最精巧的光学自动控制系统。以此作为生物原型进行模拟，对于改善现有的光学录象仪器，将会获得有益的启发。

眼的感光系统是视网膜。它位于眼球的最

内层，也称为眼内膜。视网膜是具有十分复杂结构的膜，自外向内可以分为十层，其中有三级神经元构成视觉传导路径。第一级神经元为感光细胞，从形态上可分为两种：其一是视杆细胞，对光灵敏度大，可以感受弱

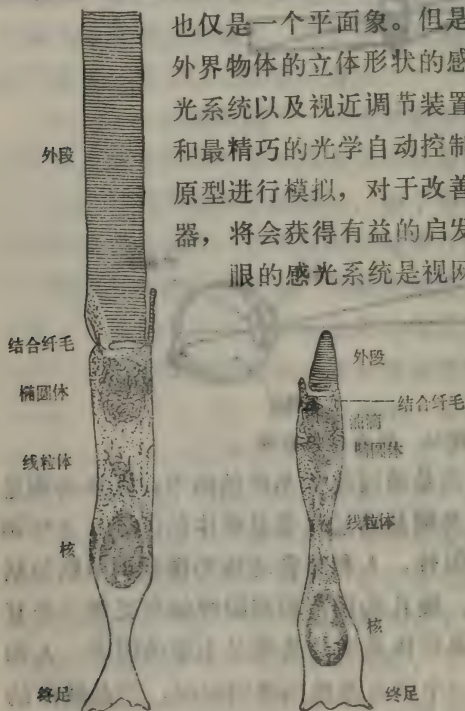


图39 两种视觉细胞

左：视杆细胞 右：视锥细胞

光，但分辨能力低，也不能分辨色觉。主要承担暗视觉（黑夜视觉）。其二是视锥细胞，对光敏感度小，但分辨能力强，而且可以产生色觉，主要承担明视觉（白天视觉）。一般昼伏夜出的动物，其视网膜内的感光细胞以视杆细胞为主，而白天活动的动物则以视锥细胞为主。例如鸟类视网膜上视杆细胞与视锥细胞的比例为1:6，有些动物的感光细胞甚至完全是视锥细胞。人的视网膜上、视锥细胞约有5~7百万，主



图40 视网膜结构模式图

要分布在视网膜的中心部位。视杆细胞约有1.2亿个，主要分布在视网膜的边缘部位。第二级神经元为双极细胞，它的一个细胞突起与感光细胞相联系，另一个突起与第三级神经元——视神经节细胞相联系(图40)。人的视神经节细胞约有一百万个。神经节细胞发出的轴突，离开眼球后即为视神经，进入颅腔后，在大脑底部形成强大的视神经束，在间脑的外膝体处交换神经元。来自视神经的传入冲动最终到达大脑枕区的皮层——视觉中枢。在视网膜上三级神经元的相互联系方式是极其复杂的，它们在视网膜的边缘部分和中心部位的联系方式则全然不同。在中央区域(中央凹内)感光细胞全部是视锥细胞，在神经元的联系方式上，每一个双极细胞仅与一个视锥细胞联系，双极细胞的另一个突起也仅与一个视神经节细胞相连。它们在数量上是1:1:

1 的比例。因此,每个视锥细胞接受光照后,产生的神经冲动是以直线方式传向视觉中枢。从视网膜中心部位向边缘部分移行。视杆细胞的数量逐渐增多,视锥细胞的数量越来越少,一个双极细胞与多个感光细胞联系,而多个双极细胞才与一个视神经节细胞联系。在视网膜的边缘处,一个视神经节细胞与感光细胞联系的数量可达250个之多。其中一些双极细胞还是通过无足细胞与视神经节细胞间接发生联系。视网膜这种复杂的细胞间联系方式、反映出视觉信息在视网膜的传递过程中,具有不同的网络途径,这也正是视觉系统外周神经组织对信息实现初步处理的结构和功能基础。

对于视觉器官的仿生学研究可以包括两个方面:其一是有关人工视觉的模拟。人眼在适应于黑暗的状态下,表现了对光的极大敏感性,可以接受 10^{-10} 尔格能量的光能,即可以对仅有十几个的光子产生视觉反应。为什么有这么大的光敏感性,目前还不清楚。人们详细地研究了感光细胞中光化学反应过程,射入眼内的光子能被视网膜所感受,是由于在感光细胞中可以被感光物质所吸收,产生光化学反应,同时将光能转化为电能,即引起神经冲动。借助电子显微镜的观察发现,感光细胞的外段具有平行排列的薄片结构。每个感光细胞大约有一千个薄片,每个薄片的膜上含有一千个感光色素分子。因此,每个视杆细胞内大约含有一百万个感光色素分子。所谓感光色素,在视杆细胞内为视紫红质,在视锥细胞内为视紫蓝质。目前对于视紫红质的研究比较深入,有人从牛的视网膜中提取出视紫红质的纯品,其分子量为27万。它是由维生素A醛(视黄醛)与视蛋白的结合物。近年来的研究表明,在暗光下,视紫红质实际上是以一个11-顺视黄醛和

一个视蛋白分子结合成复合物的形式存在，当受到光照时，顺视黄醛将转变成反式视黄醛，引起分子构型的改变，即产生电。经过电流放大（有人估计电流放大功率可达十万倍）后，产生感光细胞电位，进而引起神经冲动，再经过信息加工，在大脑皮层上产生视觉。在苏联有人设计了一种模型体系，他们用胰凝乳蛋白酶代替视蛋白，以顺式肉桂酸代替顺视黄醛。顺式肉桂酸对于胰凝乳蛋白酶有抑制作用，但是，在光照作用下，顺式肉桂酸可以转变成反式肉桂酸，后者即失去对胰凝乳蛋白酶的抑制作用。因此，选择适于胰凝乳蛋白酶作用的底物（蛋白质），在暗光下，胰凝乳蛋白酶的水解蛋白作用受到顺式肉桂酸的抑制，但在光照下，利用反式肉桂酸对胰凝乳蛋白酶抑制作用的解除，酶发挥了正常催化水解蛋白质的作用，得到蛋白质分解产物，在预先加入显色剂的情况下，可使这些产物发生显色反应。这种视觉模拟体系有可能成为一种新的非银盐信息记录材料，或最终实现模拟人工视觉。

进行人工视觉的另一类尝试的研究，是在盲人身上进行的。不通过眼睛，而是用不同组合的电刺激直接作用于大脑皮层的视觉中枢，让盲人最终产生真正的视觉。研究人员在人脑枕叶的皮层上（视觉中枢）用电极刺激皮层上的一个点，就使人产生一个光点的感觉，他们认为：视觉系统影象外部世界就是在皮层上以百万个光点构成的，正如电视机显象管的荧光屏上由成千上万个明暗不同的光点构成物象一样，用外加的电刺激模拟来自视神经上的冲动，刺激视觉中枢皮层上的某个点，脑子就能看到一个光点，这和脑通过眼睛看到一个光点是一样的。假如有许多个电极按某种图形——

某个字母的图形，刺激一些点，盲人就能“看”到许多光点，而且这些光点组成物体的轮廓，盲人就能真正感觉到看见了字母。采用不同的图形，就可以使盲人对不同的字母感受而拼读出词来。1967年在英国首次进行了临床试验，研究人员在一位失明不久的53岁妇女的脑内视觉中枢处，埋藏了80根电极，每根电极有导线穿过颅骨的一个小洞，连接在颅骨外的一组80个各自独立的无线电接收器上，通过体外的无线电发射机把信号传给埋藏在皮下的无线电接受器，接受器再把短暂的电流传送到此妇女颅内的电极上，当受到电刺激时，80个电极中只有37个能产生光点，通过这些光点这位妇女能辨别出简单的图形。近些年来，皮层光点刺激系统的实验还在进行，采用存贮有盲人所需资料的电子计算机控制所有电极的工作程序，结果使盲文中用手触觉的突起转变成盲人可以感觉到的光点，结果可以使盲人“阅读”盲文的速度比手摸加快五倍。虽然如此，人工视觉只能造成粗略的形象，但是它给人们很大鼓励，期待着获得可以代替真正视力的人造眼。

对于视觉器官进行模拟的第二方面的研究，是关于生物信息加工技术的模拟。人和动物眼睛的视网膜是生物信息加工系统的典型之一。为了研究图象识别原理，人们研究了不同动物视网膜的结构，并模拟设计了一些视网膜网络的电子模型，取得了一批有效的成果，以下仅作简单介绍：

例如对蛙眼的研究。把微电极插入暴露出来的视神经上，将视神经元的电变化引导出来，显示在示波器和扬声器上，然后在蛙眼前给予各种光和物的刺激，观察蛙视神经上传导的脉冲变化。人们发现蛙眼的视觉有一个有趣的特

性，对静止的物体，好似视而不见，即使是喜食的小虫爬在眼前，蛙也无动于衷，不予理采。但是一旦小虫运动，青蛙立即一跃而起将小虫吞入腹中。人们对蛙的视网膜的深入研究，发现有一类感光细胞，只有当目标进入它们的视野时，而且必须向着视野的中心移动，或者达到视野的中心，它们才发生反应，才有信号通过视神经传导至大脑，因此将它们称为“昆虫感受器”。人们模拟设计了蛙眼“昆虫感受器”的电子模型（图41）。这个电子模型由七个光电管和一个人造神经元组成，用光电管代替感光细胞，把其中六个光电管排在外周与人造神经元的兴奋输入端相连，将另一个光电管布于中央处并与人造神经元的抑制性输入端相连。当七个光电管均被照射时，通过

电路中各种参数的调整使人造神经元的输出为零。当一个不透光的小圆盘向光电管运动时，其阴影挡住外周光电管时，人造神经元的总输入为负值，此时神经元没有输出，但是当小圆盘移入中央部位遮住中心光电管时，使抑制性输入等于零。而人造神经元的总输入即为六个光电管的兴奋性输入之和为正，人造神经

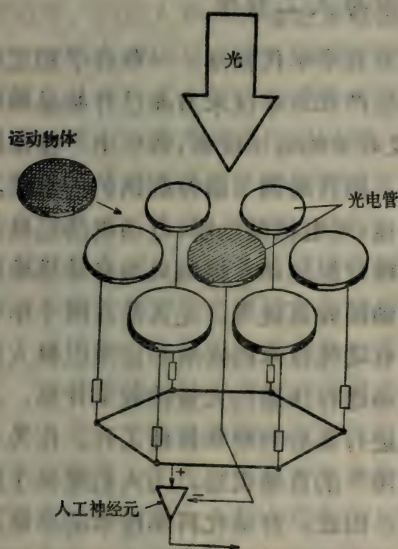


图41 蛙眼“昆虫感受器”电子模型

元立即有信号传出，表明人造神经元已被兴奋，犹如青蛙发现小虫运动一样。由此而设计的“电子蛙眼”安装在机场用来监视飞机的起飞和降落。

采用相同的研究方法，发现鸽子的视觉系统中有六种功能专一的神经节细胞，其中一种是方向边感觉器，它对于按特殊方向运动物体的边缘发生反应。如果物体按其相反方向运动则视而不见，由此人们采用了200个光电管和175个人造神经元设计了方向边感受器神经元网络模型。用它来装备一种警戒雷达，安置在国境线或机场边缘，它只监视飞进来的飞机和导弹，对于飞出去的却置之不理。

（三）脑模拟与人工智能

在二十世纪四十年代至五十年代初期，一些科学和工业技术发达的国家，在工业生产和军事技术方面已开始采用各种自动调节器，伺服系统及有关的电子设备，实现生产操作的自动化或半自动化。例如：用自动调节器控制锅炉的水位，蒸气的温度，水轮机的转速。发电机的电压、电动机的运转，用伺服系统使雷达自动跟踪目标运动，控制火炮自动瞄准射击，构成飞机、舰艇的自动操舵系统等。尤其是在四十年代末期电子计算机问世，对自动化技术的发展和应用的以很大的影响。电子计算机能够自动进行快速的大量的数字计算，不仅计算的精确度高，还能进行某些判断和推理工作。作为一种能计算、有记忆“会思考”的自动机器，为人们提供了脑力劳动自动化的技术工具。因此，自动化科学技术的出现，就使人们从繁重的体力劳动和大量的重复的脑力劳动中解放出来。为了研究设备自动化的设计方法及性能分析，人们还

研究了生物体内各种生理活动自动调节的规律，相应地出现了有关自动调节原理和伺服系统理论的新学科。四十年代末期，在电子计算机、自动调节、通讯技术、神经解剖学、神经生理学和数学等学科的相互渗透的基础上，形成了一门新的边缘科学——控制论。它是用来研究自动机器和生物体内控制与通讯的共同规律。例如：反馈原理既是各种自动调节器和伺服系统设计的原理，也是机体内许多生理活动如血糖浓度、血压调节、肌紧张等调节机理的规律。控制论从控制和信息的观点，把生物和机器联系起来。所谓“控制”是指包括调节、操纵、管理和指挥的含意。所谓“信息”包括“声、光、电、磁、热等各种能量形式的信号、情报、指令、密码等。例如人和动物通过感觉器官接收到机体内外环境发生改变的各种信号，传入到神经系统——大脑，肌肉系统和腺体也从神经系统接收到进行活动的信号而完成某种反应，以及生殖细胞携带的遗传密码等，都是属于信息的范畴。在生物界尤其是人体中，控制和通讯十分巧妙而完善，包括了信息的产生，换能、传递、处理、编码、综合、识别和记忆等非常复杂的生理过程。通过控制论的研究，使人们认识到探索生物控制和信息系统的奥秘将为研制各种自动调节、计算、通讯的自动机器带来新的启示。

高等动物的神经系统，尤其是人脑，作为控制系统乃是世界上最完善的自动控制系统。电子计算机的构造和工作过程的不断改进，在一定程度上是对神经系统和神经活动过程进行模拟的结果。大脑实现控制机制的两个最基本的环节是神经冲动的性质和神经元的网络结构。神经生理学对这两个问题的研究虽然还远没有彻底搞清楚，但是已经取得的认识

对于提高电子计算机的性能也是非常有益的。在本章关于神经元的模拟一节中关于神经元活动的“全或无”特性，就具有计算机所采用的二进位制的形式。而阐明大脑内神经元的网络结构乃是阐明大脑控制系统的关键。在神经网络中如时间总和、空间总和，具有类似计算机内加法器的逻辑单元所进行的综合作用。而闭锁式振荡回路内神经活动，几乎是往返不断地进行着，它们所需要的能量来自神经元代谢的本身。实验证明，这种持久的神经活动在“学习”和“记忆”过程中发挥作用。人们对神经系统的网络研究还深入到网状结构中去，根据神经解剖学的资料进行定量的分析并进行模拟，把计算机的微型组件如同网状结构内的一串神经细胞团那样组成一个接一个的阵列，整个模型可以进行调节、综合、识别、预报，并使模型的反应能力能初步的适应于环境的变化，这就为计算机设计具有适应性的指挥系统和控制系统提供了模型。可见进行脑模拟的目的就是为了发现新的控制原理，以神经系统的逻辑活动过程以及神经网络的结构来改进电子计算机。

就目前的电子计算机性能和人脑进行比较，实为相差十万八千里。人脑是由一百亿个以上的神经元组成的精细的控制系统，具有高度的可靠性。虽然每小时就有一千个神经元发生功能故障，在人的一生中将有近十分之一的神经元功能失调。但是仍可保持脑的自动控制机能正常进行。这提示在脑内的神经网络中备有足够的后备力量，保证了系统功能的可靠性。工程师们都明确：可靠性乃是工程技术中头等重要的课题。神经系统的结构成功地解决了这一困难，然而，即使采用人脑神经元数量的百分之一，即建造一台由一百万个

元件组成的计算机就很难保证进行正常的工作。

人脑可以进行学习和记忆。但是就记忆的容量来看，电子计算机比起人脑是非常有限的。人脑的记忆容量可达到 10^{15} 比特信息（比特是信息量的单位），而计算机的最大记忆容量为 $10^7 \sim 10^8$ 比特，相差一千万倍，脑的记忆是通过脑细胞内蛋白质分子变化来实现的，但是记忆也依赖于神经元之间的相互联系。脑细胞之间有非常复杂的网络，可以把贮存在许多部位的信息联系起来，而且，脑还有与记忆相反的神经活动过程——忘记。所谓忘记就是去掉不再需要的信息。

脑的另一个重要的功能是“识别”能力。这是在学习和记忆的基础上进行的，它是一个复杂的神经过程，例如图样识别，它是包括空间和时间两个方面的含义。在空间方面能够区别各种事物的特点，在时间方面可以发现同一事物随时间的变化，人通过大脑和眼的组合作用可以同时完成这两方面的功能。通过眼睛可以观察外界事物，用全息的方法记录在大脑内，以后再遇到类似的事物时，就用以前记忆的事物同新观察到的事物相比较，以此识别外界事物，这个过程叫作图样识别。例如久别重逢的老朋友一见面就会认识，而且能指出对方的变化。人脑对于外界事物的这种识别能力是相当强的，并且可以同时完成对空间和时间两方面的识别。脑的识别过程也即是思考的过程，这是目前任何计算机所无法比拟的。

人脑所以能作为最完善的自动控制系统的一个重要特点，在于它具有适应性的能力。人体的各种生理活动在大脑的控制和调节下，可以随时适应体外环境和体内机能状态的变化。例如：人在开始进行体力劳动之时，身体内的各器官

系统均发生适应性变化、循环系统表现为心跳加快，心搏有力，使心脏输出血量增加，血流加快。呼吸系统表现为呼吸加快、加强，保持身体氧气的充足供应。汗腺活动加强，有利于散热等。甚至有些反应在神经系统的条件反射的调节下，或通过第二信号系统——语言（如劳动前的动员），在劳动之前即发生了改变，即提前作好适应于体力劳动时机体需要的准备工作。人脑的这种自适应能力也是任何机器无与伦比的。

随着自动化科学技术的飞速发展，到七十年代，生产过程自动化水平已经由单机、局部自动化发展到全盘、综合自动化。采用电子技术和自动装置在电子计算机控制下形成自动生产线或自动化车间，从原料进厂到产品出厂都是自动化的过程，在军事技术方面几乎所有的武器装置都已自动化，例如导弹从基地发射，沿轨道飞行到准确地命中目标；无人驾驶的侦察飞机从起飞、航行、侦察、返回基地都是自动化。从上述例子说明，对于自动化装置的控制程序大大超出对少数变量的控制，而是需要同时对多个变量的最优控制。为满足对多变量的自动调节的要求，需要设计可以自动分析的最优控制系统。由于自动控制装置是按照人所规定的固定程序进行工作的，它对外界环境缺乏自动分析和灵活的适应能力。如果发生意外情况，机器不能随机应变，结果不是机器停止工作就是会发生事故。因此，要使机器具有适应环境的能力，能在外界条件变化和有干扰的环境中实现最优控制，首先需使机器对外界进入的信息有识别的能力，第二要能“独立地”制定处理信息的程序和根据最后结果判断这些程序的能力，并能选择出最佳程序而达到最优控制。这些问题的解决也促

进了自动化科学理论的发展。由“经典控制论”发展到“现代控制论”。它的基本内容就是设计和分析自动化装置的最优控制系统。

要使机器能接收外界的信息，就要使机器能直接利用自然形式的信息，这是当前自动化科学技术研究的重要课题之一。电子计算机只能接受由光电输入机送来的二进位制编码的程序和指令，但是人可以借助听觉、嗅觉和视觉等感觉器官直接感受外界各种自然形式的信息，如声音、语言、气味、图形、文字、颜色等，所以必须大力研究制造对文字、图形和声音的自动识别机，也就是对人的视觉、听觉进行的人工模拟，有些成果已经开始应用。例如：图象自动识别装置在



图42 机器人识别心电图

军事侦察上可以发现敌方的军事设施，装在导弹上可自动寻找敌方目标，在医学上对心电图，脑电图的识别可以进行诊断而利于对危重病人进行监护，也可用于对癌细胞的诊断。此外，对于指纹的识别在破案中也有很大的用处。

使机器能够利用自然信息，从而具有适应环境变化的能力，就是要赋予机器“人工智能”，即关于信息的控制、利用和转换的问题。让自动化机器模拟人的适应性，具有自适应控制能力，在目前也是现代自动化科学技术研究的另一个重要课题。例如“机器人”就是典型的代表。机器人的出现源于二十世纪六十年代专用电子计算机的问世，把电子计算机插入自动机器的反馈回路内，使全部控制方法比以前仅有简

单的反馈回路要丰富多了。计算机具有高速计算并能作出决定的能力，这样就可以及时改变自动机器的控制程序，最后使机器在某种程度上独立判断它同变化的环境的相互关系。所谓“机器人”，就是可以模拟人或代替人从事操作的自动机器，在外观上与人的形象相差很大，可以说绝大部分根本不象人，所以被称为“人”，只是取于人们很早以来在科学幻想小说中创造的机器人的称呼而已。目前的机器人技术有两个主要的分支，一个是技术上的；另一个是科学上的。

在实用工业机器人发展中，主要的指标是可靠性和有经济效益。目前全世界工厂里使用的机器人已数以万计（1975年底，据不完全统计世界上大约已有五千九百个机器人，1979年机器人的总数约有十二万个）。笼统地称为机器人的装置，一般比较简单，只有最基本的操作能力。它们很少或根本没有感知外界环境状况的能力，只要打开开关，它们就执行一系列的预定操作。机器每一关节的运动都有机械制动器规定动作的限度，而动作的每一细节又受到控电盘所产生的电力或气动力所支配。如果在机器上加入电子记忆和数字控制线路，就能达到更复杂的控制水平和提高机器人的能力。美国工业中最常用的一类机器人就是使用了数字伺服机构，并装有贮存程序的电镀丝记忆，机器人的工作程序是按照人们要它所通过的位置序列来编制的。指导人使用手提控制盒，盒上装有控制机器人每一关节的速率控制按钮，经过指导人的“示范教学”后，机器人按照固定程序进入生产线操作，可以做冲压加工、铸造、电焊、电镀、喷漆等工作。电子记忆使机器人可以贮存几种程序，并根据不同的输入信号或外部传感器的反馈，选择这一种或那一种。例如：机器

人在点焊汽车体就可以按程序处理装配线上各种各样的混在一起的汽车模型。上述工业机器人达到这种水平的性能，对很多工业应用来说，足以完成许多不同的任务。机器人的出现可以代替人进行体力繁重或危险的工作，如高压、高温的工作环境，进行放射性物质的操作，污染物的处理，海底探矿和打捞等操作，都可以由机器人来承担。例如：1966年美国军用飞机在地中海上空失事，掉入海中的氢弹就是由机器人下海打捞上来的。这个能下海打捞东西的机器人，身上装有两个平衡箱，使它在水中保持平衡，身后的螺旋桨推动机器人在水中的行动。身体的前面安装有摄象机、声波探测器、位置测定器以及信号灯等各种仪器，构成了机器人眼、耳等感觉器官。它有一只能拿取物体的强大的铁“手”，虽然机器人的体重已达到一吨，但是它的手却能拿取重达几吨的东西。机器人在海底看到的一切都可以反映到控制船的电视荧光屏上，工作人员在船上通过电子计算机对机器人进行监控，使它在水中可以朝着“前后”、“左右”、“升降”三个方向灵活自如的游走。就是这个机器人，从它“诞生”以来已进行过37次沉入几百米的海底打捞武器的工作。真不愧是一个出色的“潜水员”。又如日本设计和制造了可以灭火的机器人，它的双脚是可以滚动的履带，好似坦克一样。它的眼睛是红外线立体电视摄象机，头上还装有温度计，照明灯和一门高压水枪。在火灾现场消防人员在指挥车上通过机器人的眼睛（摄象机）观察火情，并指挥机器人向火势凶猛的地方用水枪喷射强大的水流灭火。美国进行月球科学考察时，在月球上还使用了宇航机器人，它具有摄象机、机械手、土壤化学分析仪等设备，以太阳能电池为能量来源。1967年由“阿波罗12

号”飞船送上月球，宇航机器人在空中实验室工作人员的控制下，可在2.23平方米范围内，挖掘月球表面46厘米深处岩土样品，并立即在现场对样品进行化验，然后把分析结果发回地球。现在改进的宇航机器人有两台电视摄象机作眼睛，有两只手臂可以钻探和挖掘，还有两只可以自行走动的脚。

机器人在自动化科学技术的研究中，主要集中在力图给机器人配备智力，这是人工智能应用的一个方面。随着自动化科学技术的飞速发展，将在更大程度上模仿人的智能。可以说自动机器能在多大程度上模仿或代替人，这是衡量自动化水平的尺度。目前的电子计算机虽然已经有了很大的本领，它的应用已达三千多种，并且还在不断发展，但是电子计算机和人的大脑相比，它的智能在许多方面还赶不上一个小孩子的水平。为了提高电子计算机的智能水平，需要研制新型的智能自动机。模拟智能或称人工智能，是探索和模拟人的感觉和思维过程规律的科学，它是在控制论、计算机科学、仿生学、心理学等学科的基础上发展起来的一门新的边缘科学。它的主要研究内容包括：感觉和思维模型的建立，即研究人的学习、探索、联想等活动的过程和机制；用机器进行图象识别和物体识别；用计算机求解问题、证明定理、理解人的语言等。尽管目前对于人类思维、学习和记忆等复杂的神经生理过程的认识还很不清楚，真实的模拟还有困难，但是人的思维也是物质运动的一种形式，最终是可以被人们逐步认识的，也是能模拟的。在神经解剖学、神经生理学和电生理学研究的启发下，研究大脑内各种神经细胞在空间和时间上的联系，对大脑进行电子技术性模拟，将为设计各种新的电子计算机开辟新的途径。目前利用人工神经元来模拟大

脑的机器已经取得很大的进展。已经制成学习机、识别机、翻译机等智能计算机。例如：学习机可以模拟人的学习能力，经过一个时期的“学习”能自动分辨海豚和潜水艇的声波；翻译机在六十年代中期即已问世，可以对情报资料进行自动翻译、编排。香港中文大学的中译英翻译机已将我国的数学学报、物理学报译成英文，翻译一页只需要15秒钟。1982年4月19日苏联发射的礼炮-7号空间站安装了一个新型的自动导航系统，称为德尔它。虽然在外形上丝毫不象幻想小说中所描绘的机器人，但是德尔它每天在电传打字机纸带上打下航行的信息。例如空间站在运行中进入与离开阴影的时间、无线电通信时间、轨道运行周期、空间站通过地球赤道上空时间，此外还承担控制站内电源和航行定位的工作，这样就大大地减轻了宇航员的工作量。

有些智能电子计算机可以证明几何定理、下棋、制定作战方案、自动诊断疾病等。总之，随着仿生学和电子技术的发展，各种类型的智能机肯定会不断地向高级型式发展。可以预见，在不久的将来，将会出现进一步模拟人脑智能的“电子脑”，模仿人的视觉和听觉的“电子眼”和“电子耳”以及模拟触觉和本体感觉的、具有动作灵活协调的“机械手”和行走自如的“机械脚”。那时将会出现比现在工业机器人高明得多的“智能机器人”。它们能直接看图识字，会分辨五颜六色，可以听懂人的语言，它们能够自己识别工作环境和控制对象，可以做出判断和决策，能够适应环境条件的变化。它们可以在人发出的各种口令的指挥下，替人到深海里去探矿、采油，也可以到宇宙空间的各个星球上去进行科学考察，毫无疑问，智能机器人的广泛应用，将把自动化科学技术提

高到一个崭新的阶段。并将极大地提高劳动生产率。但是，还必需指出，不管“智能机器人”有多么高明的本领，也只不过是人的助手，所谓“智能”是指人脑的思维能力，它绝不能脱离人脑而存在，人的智能也不是人脑中自生自长的，而是在实践中产生的。人类自己创造出的“电子脑”如果不给予它输入或贮存信息，那么这个电子脑也就只是一个人脑的电子模型而已，它本身绝不能产生什么“智能”，智能机器人仅仅是能够延长人的手和脚和代替人的部分思维活动，因为它是按照人的指令进行工作的。机器人所具有的智能，可以说仅仅是人类智能在机器上的投影而已。人类在实践中所获得的适应于实践所需要的高度能动性、灵活性及精细的适应能力是任何机器所望尘莫及的。因此，在自动化科学技术高度发达的未来，人类认识和控制自然的本领大大地加强了，各种自动机器成了人类的“能干的助手”和“驯服的工具”，人们将有更多的时间和精力去从事创造性的劳动。



四、化学与仿生

当代生物学在物理学、化学等学科的推动和渗透下，非常迅速地发展起来，逐渐由观察生命活动的现象深入到认识生命活动的本质。恩格斯早已指出：“生命是蛋白体的存在方式，这种存在方式本质上就在于这些蛋白体的化学组成部分的不断的自我更新。”因此，生命的物质基础是蛋白体；而生命的活动也就是蛋白体运动的体现，所谓蛋白体主要是包括了蛋白质、酶和核酸等生物大分子。这些大分子一般是由几千甚至几十万个原子组成，分子量有几万直至几百万之多，它们有复杂的结构，而且有精巧的生物功能。因此，在生命活动中蛋白质、酶、核酸等生物大分子发挥了极其重要的作用。随着对生物大分子的深入研究，在生物学的领域中逐渐形成了一门新的学科称为分子生物学，它的主要内容就是研究生物体的物质基础——特别是蛋白质、酶、核酸等生物大分子的结构和运动规律，来探索生命现象的本质。近二十年以来，分子生物学发展很快。例如：对于遗传物质脱氧核糖核酸（DNA）双股螺旋结构的发现；对于酶作用原理的深入研究；蛋白质、酶、核酸化学结构与空间结构的测定，以及这些生物大分子的结构与功能的关系；蛋白质与核酸的人工合成，尤其是在我国首先实现牛胰岛素的蛋白质全化学的人工合成等已经取得了许多重大成果。分子生物学的兴起不仅推动了生物学的全面发展，而且对其它学科也产生了重要

的影响，尤其已经渗透到化学的各个研究领域。分子生物学的课题也成为化学各领域的研究对象。

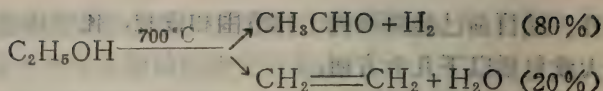
生物体经过亿万年的进化，在其生命活动中已经形成了有关进行化学反应、能量转换、信息传送和物质输送等一整套的卓有成效的技能。它们具有高效、特异和条件温和等特点，有当前一切人工的化学工艺过程所远远达不到的优越性。例如：植物叶子中的叶绿体能高效率地利用日光能把二氧化碳和水等简单的化合物，通过光合作用制造成结构复杂的碳水化合物。单细胞的根瘤菌，借助于固氮酶的生物催化作用，在常温、常压的条件下，就能捕捉空气中的氮素形成氨。人和动物体内的细胞膜能敏捷地接受和发出信息，改变着细胞的活动水平，而且能把细胞需要的物质吸收进来，把废物及时排出，保证细胞进行有条不紊的新陈代谢等等。以上这些生物技能就是在生物大分子中进行的。因此，以生物大分子作为生物原型进行深入研究，阐明其功能特性，必将为化学各领域内寻求新的技术原理，创造新的化学工艺开辟十分有效的途径。于是，在分子生物学迅速发展的推动下，在化学和生物学之间又产生了一门新的边缘科学——化学仿生学。化学仿生学是在分子水平上模拟生物的功能，将生物的功能原理用于化学，借以改善现有的和创造崭新的化学原理和工艺。

化学仿生学是一门新兴的科学，它的研究不仅渗透到分子生物学的各种研究对象，而且最终是对各种生物过程的化学模拟，尽管人们对于化学仿生学的研究范围、意义和发展有不同的认识，但是已经有越来越多的化学工作者以原来的化学学科基础为出发点，进行探讨模拟生物过程的各种可能

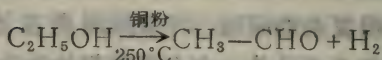
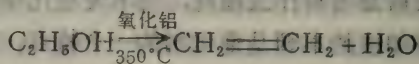
性。就目前已经开展的工作范围和设想，化学仿生学的研究大致包括以下几个方面：

(一) 生物体内化学反应过程的模拟

目前在石油工业、化学工业的生产过程中都广泛采用催化剂。催化剂能够使一些化学反应的速度加快，而它们本身在化学反应结束后却没有什么损耗，也不发生化学变化，这种能使化学反应加快的本领是催化剂的一个特点，称为“活性”，催化剂的活性越高，被它催化的化学反应速度就越快。催化剂的活性是个很复杂的问题，许多原因现在还不很清楚，目前比较普遍的看法认为，在有催化剂的化学反应中，当参加反应的不同分子在互相进行化学反应之前，催化剂就先和反应分子接触，发生一些特殊的物理和化学作用，使这些反应分子的化学结构发生了有利于起化学反应的变化，然后才参加化学反应。因此，催化剂也是积极参加化学反应的，但是在反应之后还能从反应中解脱出来，仍然保持原来的性质。例如：在室温条件下，把氢气和氧气按2:1的比例放入玻璃瓶内密封，即使经过很长时间，也只有少量的氢气和氧气发生反应而生成水。但是，如果在瓶内加入少量的白金粉末，绝大部分的氢气和氧气几乎立即化合成水，而白金粉末的数量和质量都没有发生改变。催化剂的第二个特点是对所催化的化学反应方向有选择性，使化学反应沿着某一方向进行。例如：把乙醇的蒸气通入玻璃瓶内，当加热到 700°C 时，乙醇就会发生两个不同的化学反应。其中80%的乙醇分解为乙醛和氢气，其余20%的乙醇被分解为乙烯和水。



如果在玻璃管中加入一些氧化铝作为催化剂，在 350°C 时乙醇全部分解为乙烯和水，如果在玻璃管中加入铜粉为催化剂，只要加热到 250°C 时，乙醇就全部分解为乙醛和氢气。



可见，不同的催化剂可使同一反应物的化学反应向不同的方向进行。在工业生产中，催化剂的选择性越强，反应中生成的目的产物就越多，而副产物就越少。

此外，催化剂在长期使用中，还会发生“衰老”的现象，表现为活性降低，如果催化剂的稳定性越好，保持活性的时间也越长。因此，活性，选择性和稳定性是催化剂的三个性能指标。

在二十世纪初，催化技术即开始应用于化学工业如合成氨、硫酸和硝酸的生产过程。在三十年代以后，在石油炼制生产工艺上开始广泛使用催化技术，到五十年代以后，用石油为原料生产塑料，合成纤维、合成橡胶等石油化学工艺技术，催化剂的应用发挥了关键性的作用。因此，可以说催化技术在石油和化工生产中已成为重要支柱。但是在工业生产中使用的催化剂一般都需要在高压和高温条件下才能发挥催化作用，消耗大量的能量。然而在生物界，生物体内每时每

细胞都进行着化学反应，生物的新陈代谢是生命活动的本质，而新陈代谢就是由成千种的化学反应所组成，这些化学反应几乎都是催化反应，它们是在天然的生物催化剂——酶的作用下完成的。酶是一种蛋白质，它作为一种生物催化剂与一般催化剂比较表现出显著的特点：

其一为高效性。酶作为生物催化剂其催化效率是非常高的。例如催化过氧化氢分解成为氧和水，体内一个过氧化氢分解酶的分子，能够在一分钟分解约五千万个过氧化氢分子，这种催化效率比一般无机催化剂的效率高一千万倍。有些酶的催化效率可以比催化相同反应的非酶催化剂高达成亿倍甚至成万亿倍（ $10^7 \sim 10^{13}$ 倍）。

其二为专一性。也就是有惊人的选择性，在细胞内有成千种酶，它们都参加时刻进行着的上千种的化学反应，但是每一种酶仅催化某一特定的反应而不影响甚至是极为相似的其它反应，能够区别不同的光学异构体，这在合成化学中几乎是最困难的问题。所以，合成化学家对酶是非常羡慕的。此外，酶的专一性还表现在每一种酶通常只催化一种反应专门向一个特定产物的方向进行，完全没有副反应发生，这是现在工业生产中使用的催化剂远远不能比拟的。

其三是酶的反应条件比较温和，它不象工业催化剂那样需要高温高压，而是在常温常压下就能催化生物体内化学反应的进行。在工业生产中，人们虽然合成了数以千万吨的氨，但是付出了巨大的代价。用催化剂将氮和氢结合成氨需要 500°C 高温和200~300公斤的高压才能奏效。但是豆科植物根瘤菌在所含有的固氮酶催化作用下，每年把空气中的氮转变成的氨几乎竟达两亿吨。

酶作为生物催化剂显示出比非酶催化剂有极大的优点。如果我们能深入了解酶的催化原理，并模仿这些原理来制造化学工业上广泛应用的催化剂，那将会引起化学工业上一场革命。

关于人类对酶的应用，我国劳动人民早在几千年前就掌握了用酒曲酿酒的技术，它的科学原理就在于利用酵母菌等微生物所产生的酶对粮食、果汁等酿酒原料中的淀粉和糖类进行催化作用，最后得到酒精和二氧化碳，这种技术一直沿用到今天。目前在一些食品和制药等工业部门应用的酶制剂是从生物细胞中提取出来的，但是数量有限，提取和纯化的手续也很复杂，对于大多数难以得到的酶，应用到工业中去的唯一办法，就是对酶进行人工模拟。

要模拟酶，就必须在分子水平上了解酶，酶是蛋白质，是由氨基酸按一定的排列顺序形成的大分子。酶分子包括成千上万的原子、它们各自处在三维空间的一定位置上，形成特殊的结构。酶的结构十分复杂，如果用非生物的方法完全模拟酶的作用是很困难的。其实并不是整个酶分子都与催化作用有直接关系，其中与催化作用有关的只是它的一部分，即活性部分。因此，人工模拟酶主要是模拟它的活性部分。这就需要首先把酶的催化活性部分搞清楚，包括那些集团，然后以简化了的化学模型来模拟酶的催化反应，最终制备出象酶一样可以在常温常压下进行催化作用的人工催化剂。目前国内外很多科学工作者正积极探索这些生物催化剂的秘密，并取得一些可喜的进展，其主要的工作有如下几个方面。

1. 用金属络合物模拟酶。对于酶的深入研究发现，许多

酶都含有金属。例如过氧化氢分解酶、过氧化物酶等都含有铁，传递磷的酶含有镁，分解出二氧化碳的酶含有铬，分解蛋白质的酶也可能含有铬，固氮酶含有钼和铁等等。现在已经查明，这些金属离子往往相互之间形成一个比较小的活化群，它们在催化反应中起着活化中心的作用。这些金属活化群固定在一个分子量可达数百万的庞大的蛋白质分子（载体）上，由于这种发现，使模拟生物催化剂的研究工作找到了一条极有可能实现的途径。因此，目前对金属络合物模拟酶的研究工作开展很多。例如合成三价铁离子和三乙撑四胺的络合物，模拟过氧化氢酶辅基铁卟啉环的结构，就是一个十分成功的例子，它分解过氧化氢的速度达到了酶的速度。在模拟固氮酶的研究中，采用铁、钼、半胱氨酸双核络合物作催化剂，在常温常压下已获得很大的突破。此外，在固定二氧化碳，一氧化碳合成碳水化合物的研究工作也已经有所进展。毫无疑问，模拟生物固氮和生物固碳是具有巨大经济意义和科学价值的重要课题。目前已经成功地合成了一些模拟酶的金属络合物，形成若干新的催化体系，研究成果虽然与酶的完全模拟还有距离，但是可望改善现有的合成氨工业以及推动其他有机合成工业的发展。

2. 高分子模拟酶。分子量可以达到几万、几十万、几百万甚至上千万的化合物称为高分子化合物，简称高分子。天然的纤维素、蛋白质、核酸、橡胶等都属于高分子。现在已经能用化学方法人工地制造出许多合成高分子，而且开展了高分子功能的研究。高分子具有电绝缘性，可以进行离子交换。目前对高分子可作为催化剂和高分子半透膜的研究工作十分活跃，尤其结合医药用高分子的研究正在逐渐形成一门

新兴学科——高分子仿生学。采用高分子模拟酶，就是将已知的催化基团连接到象酶那样的合成高分子链上。这方面已进行了大量的系统的工作，其中特别重要的一类是高分子模拟金属酶，将金属络合物以配价键方式连接于高分子的载体表面。这种催化剂的优点在于可以改变金属原子周围各种不同的催化功能团，以调节对催化底物的作用，或增加反应速度或提高选择性等。除利用高分子仿造酶的结构合成高效催化剂外，也还可以将微生物发酵和制取的酶同高分子结合起来，形成“固体酶”。“固体酶”可增加酶的稳定性，并具有不溶于水，易和反应物分离而利于连续加工、重复使用等特点。这方面的工作也在大量开展，并已在工业上开始应用。1974年有些国家就以玉米淀粉为原料，经固相葡萄糖异构酶的催化，制成了几十万吨无论在营养价值或是甜味感觉上都和蔗糖一样的糖浆。

关于模拟酶的研究除了以上两个方面外，近年来对于一些大环化合物作为酶模型的研究也受到了广泛的重视。在酶催化作用特异性的启发下，人们已经成功地合成了一类具有光学活性的化合物，它可以催化不对称合成反应，分离光学异构体等，到1973年人们就已合成了包括氮、硫等原子在内的大环化合物二百多种。这类大环化合物还可用来分离稀土元素，用作特殊的反应试剂以及作为离子选择性输送的“载体”模型而广泛地用于生物膜的研究中。

总之，利用酶的作用原理，模拟合成各种具有高效、专一和选择性强的非酶催化剂是当前和未来化学工业中重要的课题之一，也是化学领域内核心问题之一。对于生物体内化学反应的模拟，对化学工业将会产生巨大的推动作用。另一

方面，模拟酶的研究工作也将有助于对酶的结构与功能关系的深入了解。

(二) 生物膜的模拟

生物膜是指包围整个细胞的外膜，对于真核生物还包括处于细胞内具有各种特定功能的细胞器的膜，如细胞核膜，线粒体膜，内质网膜，溶酶体膜等等，称为细胞内膜。生物膜是生物细胞的重要成分，它具有复杂的细微结构和各种独特的功能。对于生物膜的研究以及构成生命现象本质的许多问题，如能量转换、物质运转、代谢的调节控制、细胞识别、信息传递等都有密切的关系。

真核细胞的膜约占细胞干重的70~80%，它不仅仅是包围细胞质的口袋，或者区分细胞内各细胞器的隔膜，而且作为一种结构为细胞提供了细胞空间内的支持骨架，使酶和其它的物质有秩序地排列在细胞内外的“骨架”上，因而保证了细胞内有条不紊高效率地进行着成百上千的各种反应，保证了生命活动的正常进行。

生物膜的构造是非常复杂的，它的成分主要由蛋白质和脂类物质构成，此外还有少量的糖、核酸和水。其中蛋白质约占60~75%，脂类占25~40%，糖类占5%左右。其中脂类物质规定膜的形态，蛋白质则赋予膜的特殊功能。蛋白质与脂质的比例在不同的细胞膜是不同的，对于功能复杂的膜，其蛋白质的含量也高。

构成膜内脂质的主要成分是磷脂，它是一个两性分子。每一个磷脂分子由极性部分（磷脂酰碱基）和非极性部分（脂肪酸碳氢链）所组成。生物膜中的磷脂呈双分子平行排列，

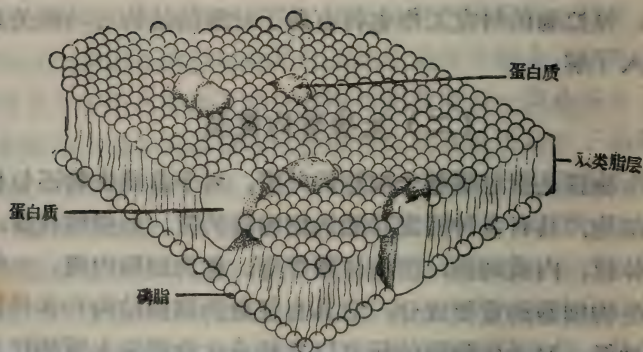


图43 生物膜结构模式图

极性部分排列于双层的外表面，非极性部分朝着膜的内部，这样就形成了膜的基本结构（图43）。蛋白质和酶等生物大分子或者主要结合在膜的表面上或者可以由膜的外侧伸入膜的中部，有的甚至可以从膜的一侧穿透两层磷脂分子而暴露于膜的另一侧外。在暴露于膜外侧的蛋白质分子上有时还带有糖类物质。这些蛋白质、酶和糖类物质在生物膜上的位置并非固定不变，而是处于一种不断运动的状态。膜的各项生理功能主要是由蛋白质、酶、糖类物质决定的。

目前对于生物膜基本结构的了解，被认为是具有疏水性的膜蛋白与不连续的脂双层的镶嵌结构。这种膜对于水溶性的物质如金属离子、糖类、氨基酸等透过膜是一个“屏障”。但是活着的正常细胞，水溶性的小分子物质仍然可以穿透细胞膜，而且在细胞内的积累浓度可以极大的超出细胞外的浓度。例如海带能从海水收集碘，其细胞内碘的浓度比海水中碘浓度提高千倍以上。人体内在颈部气管的两旁有一种内分泌腺，称为甲状腺，甲状腺的腺泡细胞对于碘也具有很强的

选择性摄取、浓缩和转运的能力。正常甲状腺中与血浆中含碘浓度之比大约为25~50:1，浓缩25倍，当腺体受到刺激时，它对碘的浓缩能力可高达350倍。人血液中的红细胞，钾离子和钠离子在细胞内外的浓度差相差一百倍。细胞内钾离子浓度比细胞外的浓度高出一百倍，而钠离子浓度在细胞膜内外的分布正好相反。细胞内钠离子浓度比细胞外低一百倍。大肠杆菌可以使细胞内乳糖的浓度比周围环境高出五百倍等等。其实在正常生活的细胞中有几百种小分子在细胞内的浓度比它们在细胞外的浓度要高得多，而另外一些小分子在细胞内的浓度则比它们在细胞外的浓度要低得多。但是细胞内外这些物质的浓度差，对于细胞的生命活动是完全必要的。如果对这些物质在细胞膜内外的浓度差哪怕是微小的改变，也会引起细胞生理功能发生障碍甚至死亡。细胞对于各种物质的吸收、排出、浓缩的能力就是通过细胞膜进行调节而实现的。人们如果能把细胞膜的这些功能模拟成功，将为提取或分离物质的化学工艺开辟新的途径。例如：制造出大面积的人工模拟生物膜作为一种容器的衬壁，然后将容器放在海水里，就犹如聚宝盆一样从海水中浓缩我们需要的物质；或者利用另一种人造生物膜专门分离出海水中的盐分，而使海水淡化；或者用人工模拟的膜来处理各种污水等等。因此，生物膜在物质转运、浓缩和分离等方面的能力使化学工作者感到惊奇和兴趣。细胞膜为什么能有这样奇妙的功能呢？物质是怎样通过膜呢？

从膜的基本结构来看，在双层磷脂分子的排列中，膜的中间区是由磷脂分子的脂肪酸碳氢链形成的非极性区，它对于水溶性物质是不相容的。这个非极性区对于金属离子、糖、

氨基酸等物质是起着阻塞作用的，犹如一条大河挡住了以上物质进入细胞内。要过河就必须解决船或桥的问题。人们对于细胞膜传递系统进行广泛而深入的研究后发现，在膜中存在着大分子的载体蛋白，这就好象发现了船一样，各种载体蛋白都各自具有专一的功能，其中有些蛋白还有催化活性，也就是酶。它们可以专一性的“装载”各自的“货物”，把它们“摆渡”过膜的非极性区而运到“彼岸”，将“货物卸下来”完成了水溶性物质通透膜的过程。近些年来人们已经分离出某些载体蛋白，它们的分子量大约为30000左右，载体蛋白在膜内外两面摆动，被运送的物质可以与载体蛋白形成可逆性的结合。每种载体都有一定的专一性，它可以“识别”被它输送的离子或其它物质。当被运送的物质靠近膜时，即被载体所“俘获”形成络合物。络合物通过膜摆动到膜的另一侧后，离子（或其它物质）从络合物中释放出来，完成物质由膜的一侧向另一侧的输送。这类输送过程称为“促进输送”。促进输送过程是顺着被输送物质的浓度差进行，物质被输送的方向是自浓度高的一侧向低浓度的一侧。载体蛋白摆动所需要的能量来自热能，或由于形成络合物或解络时蛋白质分子的微小变形，并不需要从代谢中消耗能量。载体蛋白促进输送的效率是很高的，有人详细研究了人血液中红细胞膜对葡萄糖的促进输送，该载体蛋白的分子量为45000，每个载体蛋白每秒钟可传递180个葡萄糖分子。

细胞对某种物质所具有的浓缩功能，使某物质在细胞内的含量远远超过细胞外的数量，这种物质被输送到膜内是逆着浓度差进行的。这类输送过程称为“主动输送”，而且要消耗代谢能量。如果在主动输送过程中停止能量供应，主动输

送就转变成促进输送，使膜内高浓度的物质顺着浓度差的方向将物质输送至细胞外，直至被输送的物质在细胞内外的浓度相等为止。

总之，膜的选择性输送功能，主要是由膜上的“载体”蛋白的作用来实现的，载体的作用使膜提高了渗透率，而且有高度的选择性。具有选择性的通透性是生物膜的一个特性，使细胞能接受或拒绝，保留（浓缩）或排出某种物质。人们如果能模拟生物膜的输送功能，创造出选择性强，高效的分离膜，不仅具有重要的理论意义，而且在化学工业中也有很大的实用价值。目前在模拟生物膜的“促进输送”和“主动输送”功能方面取得一些进展，利用液膜技术达到了对气体及溶液中离子的择选性分离的目的。

液膜分离技术是从七十年代初发展起来的，它是以模拟生物膜“促进输送”为基础的新方法、新技术。在液膜中加入适当的载体分子后，大大提高了液膜的渗透率和择选性，展示了良好的应用前景。例如：最近制出的人工膜系统包括三层膜结构，最里边的一层浸在辛醇中，膜的一侧是酸性溶液，另一侧是碱性溶液，并以抗生素作为载体分子。由于抗生素不易溶解于酸性或碱性溶液中，因此，它可以留在膜上，这是一个相当粗糙的模型。这种膜系统能从碱溶液中检出钠离子，通过膜释放到酸性溶液中，只要对“膜”两侧溶液的pH值进行适当的调整，这个系统还可以将锌、铅、汞、铜等离子从低浓度区输送至高浓度区。预计这样的膜系统在工业去污方面将有很大的实用价值。另一个例子是关于回收或消除二氧化碳的气体分离，利用碳酸钠、碳酸氢钠液膜在溶液中进行可逆化学反应。
$$\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{HCO}_3^-$$
促

进二氧化碳的输送。在 25°C 时， CO_2/O_2 分离系数达到1500。这一研究已经成功地应用于空间技术，以除去人造飞船座舱中的二氧化碳。此外，关于硫化氢、二氧化硫、一氧化氮等气体的选择性输送系统也展开了广泛研究。

综上所述，人工模拟生物膜输送物质的功能，把载体应用于化学分离，由此而产生的一种新的分离技术——液膜分离技术，为化学工作者实现高效、快速、专一分离目的开辟了一条新途径。人们可以根据不同的分离对象而设计不同的在液膜中进行的平衡反应（络合反应、可逆化学反应）。可以预料液膜分离技术将在气体分离、海洋资源的开发利用、微量元素的提取、特殊的化学分离以及污染的控制等各方面发挥巨大作用。而对于生物膜化学模拟工作的广泛开展也将推动对生物膜的深入研究。

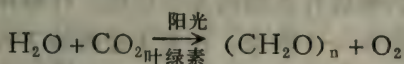
（三）生物体内能量转换的模拟

在地球上，随着社会的发展、人口与工业的增长，人类对能量的需要越来越多，能源问题已经成为重要的问题。人们正在研究采用各种办法来发展新的能源利用技术，提高换能率以及扩大能量的来源。

生物体取得能量的来源或者是象植物那样利用太阳能进行光合作用，或者是象动物那样利用食物通过一系列的氧化反应而获得能量，实则动物从食物中获取的能量也间接地来自太阳能的转换。太阳能在地球上的各种能源中占有特别重要的地位。太阳向四面八方辐射的热量仅有二十二亿分之一达到地球大气的最高层，并且还有一部分被大气反射和消耗在空气的加热上，然而每秒钟到达大地上的总能量还高达 80

万亿千瓦。因此，太阳能是地球上可以获得的能够连续供应的最大能源。直接利用太阳辐射能有三种基本方式，即光-热转换；光-电转换；光-化学转换。其中光-化学转换是利用太阳辐射能的最主要最根本的方式，绿色植物的光合作用就是光-化学转换过程。因此，仿效生物体高效地利用太阳能的能力，已成为引人注目的问题。它的重要意义在于利用地球以外的能量——太阳能，把能量消耗过程中的氧化产物——二氧化碳和水，再重新合成可以被利用的物质。所以研究和人工模拟植物的光合作用将为扩大能源找到一个新途径。此外，动物和植物进行能量转换反应所利用的能量来源虽然完全不同，但是它们的基本过程却非常相似，动物和植物都是在一系列酶系统的催化作用下最后生成三磷酸腺苷（ATP），它是生物体内的一切生理活动的直接能源。生物体内还非常有效的进行着光能、电能、化学能和机械能的相互转换。所以对生物体内能量转换的深入了解和人工模拟将会对人类更节约地利用能源做出重要的贡献。

在地球上规模最大、效率最高的利用太阳能的过程就是绿色植物进行的光合作用。绿色植物从空气中吸取二氧化碳，从土壤中吸收水分，利用太阳光能合成有机物，同时放出氧气。这个过程称为光合作用。



光合作用是地球上的一个最基本的过程，它是一切有机物质的基本来源，也是空气中氧气的主要来源，它是从太阳获得能量的最重要的方式。光合作用是一个极其复杂的生理活动，包括光能吸收、转移、电子传递、水分解、磷酸化、

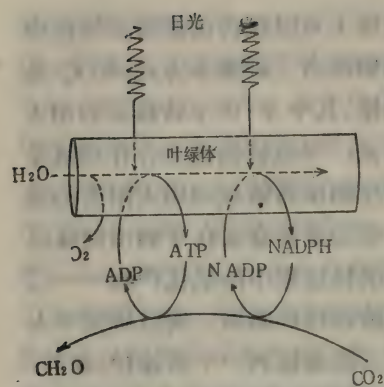


图44 叶绿体光合作用示意图

辅酶还原，二氧化碳固定与转化等几十个反应步骤。经过二百年来的科学实验，到二十世纪六十年代，科学家已经掌握了光合作用的基本程序，即植物中的叶绿体吸收光能，分解水、放出氧气，同时产生一种含高能磷酸键（ATP）和一种具有强还原能力的物质如辅酶（NADP），这两种物质再通过一些

酶的参与，把二氧化碳还原形成有机物，如糖类 $(\text{CH}_2\text{O})_n$ 。

但是，光合作用中基本的问题，如叶绿素如何汇集光能，如何把光能高效率的转化为化学能的问题还没有充分了解，还需要借助于新的物理、化学知识和技术进行深入研究。因而在目前要想对光合作用进行全部的人工模拟是不现实的，只能对光合作用的各种反应步骤分段探讨，各个击破，而且还可以与某些工业技术相互参考对比。

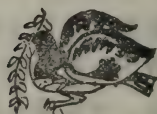
光合作用是在叶绿体中进行的，叶绿体是绿色植物细胞中含色素的颗粒。如果将细胞打碎，离心出来的叶绿体悬浮在缓冲液中，仍能进行全部的光合反应。叶绿体的直径约 $5 \sim 10$ 微米，厚约 $3 \sim 4$ 微米。在电子显微镜下可看到它的里面含有许多薄膜，厚度大约为 60 \AA （埃， $1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ 厘米）。色素都集中在膜上，而且垒叠起来。叶绿体中有好几种色素，如叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素等。它们都有颜色，能吸收可见光。但是并不都能起光化学反应，大部分色素的作用犹

如收音机的天线接收电磁波一样，它们能接收光能，通过共振传递，把光能汇集到一种特殊状态的叶绿素a而引起光化学反应。叶绿素a的化学结构在三十年代就已搞清楚，到六十年代初期可以人工合成，它是一种类似血色素的卟啉络合物，其中所含的金属是镁而不是铁。其它叶绿素的结构也基本相似，只是支链上有些区别。目前已知叶绿素a可参与光化学反应，从水分子中取得电子交给一些还原性较强的物质（如醌），这是一个强氧化弱还原的反应，同时放出分子氧，这一光化学反应就是通过叶绿素a所敏化的。既然光合作用中水分子可以被分解为氧气、氢离子和电子，那么设法将电子转移到电极上就可以人工模拟叶绿体的光电转换机制而制造高效率的光电池。如果设法使氢离子与电子结合就可以变成氢气，这样就可以成为氢气发生器，在人工模拟的系统中，经太阳光照射就可以将水分解为氢和氧，而氢气则是未来重要的能源。

绿色植物转化光能在地球上来说是规模最大、效率最高的，叶绿体的转化效率一般为35%，比目前最好的光电池（如硅电池、硫化镉电池、砷化镓电池等转换效率一般可达13~17%）效率高得多。目前利用叶绿素的光电性能试作光电池，人们进行了多方面的尝试。例如：有人用染料来代替叶绿素的敏化作用，用氧化锌半导体电极浸入含有染料的电介质溶液中，当光照时可以获得的最大电位为0.5伏。又如用铝片加上几十分子层的类似叶绿素的四酚卟啉锌作为一个电极，另一个为白金电极，这个电池在光照（橙色光）后，可以产生1.1~1.3伏的电压。这一类的工作还很多，但是转换效率还很低，远不及光合作用。

人们发现某些蓝绿藻可以在厌氧条件下放出氢，这些藻类含有一种不完全的光合器，当绿色放氧细胞产生的还原性化合物扩散到非绿色的异形细胞中时，就在那里放氢。人们对这一体系的量子转换及其酶系统进行研究，设计出仿生光解水的装置，就可获得大量可贮存的能量——氢。现在美国已经提出了实现这种过程的体系，正在深入研究。

由于在光合作用中叶绿体所引起的电子转移、敏化的氧化还原反应都涉及到光合作用的基本问题，到目前还正深入研究。尤其是水的光分解问题如有所突破，不仅有益于生物学、放射医学中一些问题的深入研究，而且将为解决能源问题提供一个最理想的途径，即利用日光能分解水产生氢，那么整个工业将会由此而发生巨大的变化。



五、农业生产与仿生

(一) 光电捕鱼

生物界中可以发光的种类很多，其中多数动物是海洋生物，包括微生物中的一些细菌、真菌，在无脊椎动物中如浮游于海面的单细胞动物，软体动物，甲壳类、珊瑚虫、蠕虫、水母以及生活在海洋深处的一些鱼类。发光动物利用生物光作为求偶、防御甚至诱捕饵料。此外，不少动物例如昆虫、鱼类虽然本身并不发光，但是却有明显的趋光性，而且每种动物仅对某一波长的光最为敏感。

生活在海洋底层的鮫鯮鱼就是利用发出的生物光来诱捕饵料。

鮫鯮鱼头部的鳍特化成一根弯曲的细棒，发光器位于棒

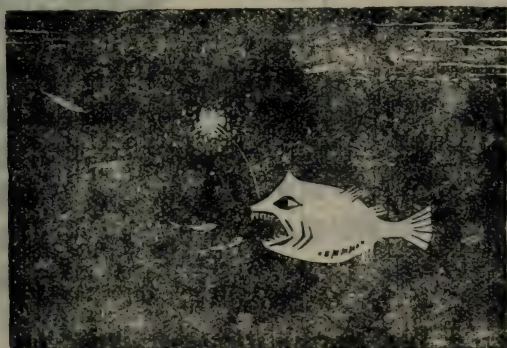


图45 鮫鯮的发光鳍

的末端，恰好悬垂于鱼嘴的前上方。发光器可以发出黄色的萤光，当小鱼趋光而来时，恰好送到鲛鳔鱼的嘴边(图45)，甚至使其他深海动物把发光鳍误为小鱼而去捕食，结果却落入鲛鳔鱼腹中。可见鲛鳔鱼正是以光诱鱼的生物仿生原型。人们也尝试以光捕鱼，还在电光源问世之前，我国劳动人民就成功地利用了生物光，在古书《古今秘苑》中记载“取羊膀胱吹胀，入萤百余枚，系于罾*足网底，群鱼不拘大小，各奔其光，聚而不动，捕之必多。”(图46)这种以萤光捕鱼的方法

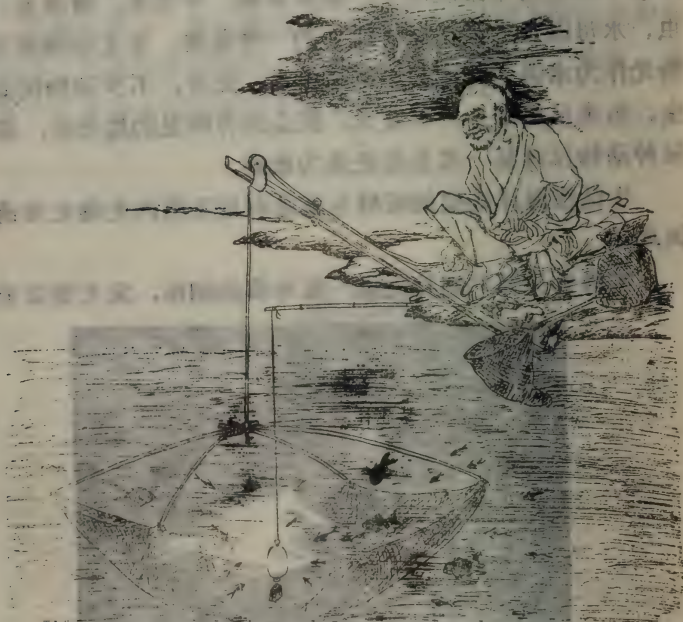


图46 我国古代以萤虫光诱鱼

* 罾 (zēng 音增) 是一种用竹竿，木棍作支架的方形鱼网。

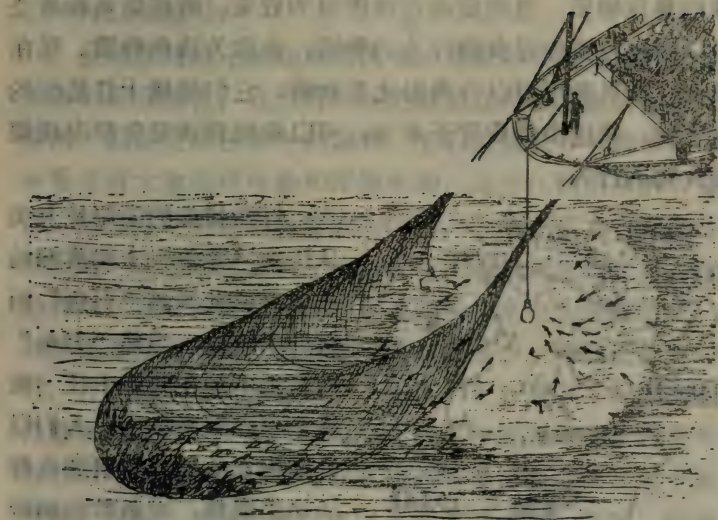


图47 灯光捕鱼

可认为是世界上“灯光捕鱼”的先驱和雏型。直到本世纪五十年代以后，在海洋渔业生产中才大规模采用灯诱围网捕鱼方法。

灯光捕鱼的光源多采用电光源，使用时必须注意防水和短路，最近已研制出一种化学光源，这种光源是利用一些特殊物质发生的化学反应，使化学能直接转变为光能，具有不发热、无声响，不怕风吹雨打，不怕燃烧爆炸，使用安全的特点，尤其适用于水下，可以作为诱鱼的光源，而且发出的光色柔和，与海洋生物的发光比较相似，用做集鱼光源，不仅有光诱作用，还有一个钓饵作用，如将化学发光器的外型模拟成具有诱捕对象的饵料生物的特征，再加入一些有特定气

味的集鱼物质，更能提高钓饵作用的效果。所谓集鱼物质是可以引起鱼类探寻食物行为的物质，也称为诱鱼物质。现在发现，从贝类中可以分离出此类物质，它们都属于氨基酸的衍生物，将这类物质置于水中，可以观察到诱发鱼群出现探寻食物的行为。

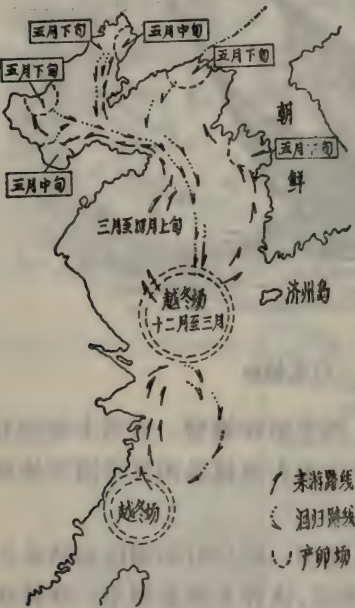


图48 黄花鱼的回游图

灯光捕鱼的采用使人类从历来“等鱼”上钩落网的被动局面发展到“召鱼”而获的新阶段，当然“召鱼”而获也不是在海洋中任一海域都可以召来鱼群，人们以长期积累的经验 and 研究鱼群活动的规律，对鱼群的洄游路线了如指掌，在一定的季节，一定的海域，将有某种鱼群洄游而至，在此海域以光诱捕，必然召而盛聚之。但是这种方法仍不免有被动性。因为只有在渔汛期，在近海的某个海域才有成效，如果一年四季都能及时探知鱼群所在，行至外海甚至远

洋也能侦获鱼群踪迹，人们才能掌握捕鱼的主动权。要实现随时能召鱼而来，犹如囊中取物，人们还必须有探测鱼群踪迹的手段。面对茫茫大海，风吹浪涌，如何探知碧波之下的游鱼呢？生活在海洋中以鱼虾为饵食的各种海洋动物决不是

等鱼入口的，它们积极寻食而且有探测饵料的本领，难道人们不可以借鉴吗？

生活在陆地上的动物与人类，视觉是获知外界变化的最重要的感觉器官，几乎有90%的信息量是通过眼睛而传入机体的。但是生活在水中的动物，它们的视觉并不高明，因为水里含有大量的微生物和浮游生物，还有江河带来的大量淤泥，使海水经常混有大量的沉淀物，因此，在水中看物清晰度很低，犹如陆地上罩于浓雾之中，即使视觉器官再好，也必然大大地限制视觉范围，况且阳光在水中大量被吸收，水对光还有过滤效应，水层越深，光线越少，即使是最好的天气，有明亮的阳光照射海面，但在一千公尺以下的深海中也仍然没有光线。因此，动物生活在浑暗的海水中，视觉的作用很小，但是不少动物却有发达的听觉，而且可在水中发出声音。目前已知蟹、虾、鱼以及海兽如海豚、海豹、海狗、海狮及鲸等都能发出频率不同的噪音。声音在水中的传播与在空气内的传播不同，声波的波长在水里要比空气内长约五倍，传播速度也加快五倍。水里发生的声波传至水面即向下反射，传到水底又会向上反射，水下发生的噪声不容易传到空气里。因此，表面上平静的海洋，水中却并不寂静，各种音频的生物噪音交汇在一起，这些嘈杂的音响在海洋动物的生活中却具有重要的信号意义。它们借助于声音寻食、防御和求偶。例如海豚就是发出超声波，利用声波反射定位的方法来探测饵鱼和避开障碍物，进行着不用视觉的航行。利用回声定位的方法又称为声纳的方法，人们对海豚的声纳本领进行了深入的研究。

海豚是生活在海洋中的哺乳动物，它没有鳃，用肺呼吸，

其鼻孔位于头的顶部，它们在水中游泳时，不时把头露于水面呼吸空气，海豚没有发音的声带，它是依靠鼻孔下瓣膜和气囊系统而发音的（图49）发出的音频范围在250赫至170千赫之间。人们对于海豚的实验研究表明，海豚具有非常精致

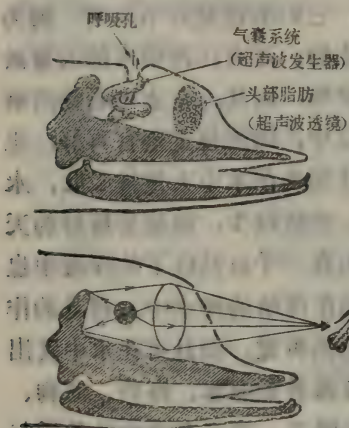


图49 海豚的回声定位器

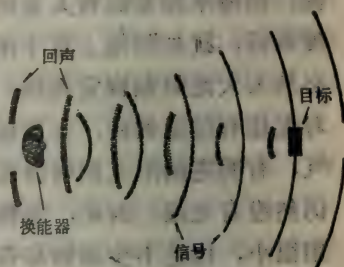


图50 回声定位示意图

的声纳系统，它在探测不同距离的目标时，发出不同音频的超声波，海豚根据对各种回声的鉴别而确定产生回声对象的距离，方向、速度、大小、形状以及性质，例如：海豚可以根据鱼身体上的回声识别鱼的大小，还能分辨出是喜欢吃的鱼和不愿吃的鱼（图50）。因此它的感受器在接收到回声以后要进行翻译的分析，这种能力说明海豚有既能发射不同音频又有抗干扰能力的卓越的发射接收机构。还有高度发达的听觉和适应于听觉的脑——对于回声的各种参数进行翻译和分析的计算机。虽然在第一次世界大战时，人们已经制造出了为探测潜水艇的水听器，但是与海豚的声纳系统相比，真是

小巫见大巫了。模拟海豚的声纳以改进人造的声纳，在国防与渔业生产上都有重大的实用价值。二十世纪五十年代以来，随着电子技术的飞速发展，电子超声波声纳系统也更加完善，不仅在潜水艇水下航行和反潜艇的侦查中占有重要位置，而且也用于渔业生产。电子超声探鱼仪既可以在垂直方向上探测渔船经过的水下情况，也可以水平方向探测鱼群的方位。用直升飞机载有超声波探鱼仪，更可以扩大探测的范围。

海洋动物除了用声波寻食和导航外，还有一些可以放电的鱼类，它们不仅有强大的发电器官，而且有电的感受器，电鱼可以向周围发射电脉冲，并接收从周围物体反射回来的电磁波，犹如一套雷达系统来感知周围的环境，电鱼本身能利用放电发出猎食、防卫、躲避障碍物和求偶的通讯，例如电鳗尾端发射出的电脉冲，可被头端的电感受器接收，当探

测出食饵时立即对准目标，发放高压闪电将其击毙，然后从容猎取。生活在海底的电鳐，身体扁平、游速缓慢，几乎没有捕获鱼虾的能力，但当周围出现鱼虾时，电鳐可发出强大的电流，将鱼虾麻痹至昏，垂手而获(图51)。电鱼如此高明的捕鱼本领给人们以有益的启发，模仿电鱼用电捕鱼是否可行呢？

首先要了解鱼在电场作用下有哪些反应。如果将铜

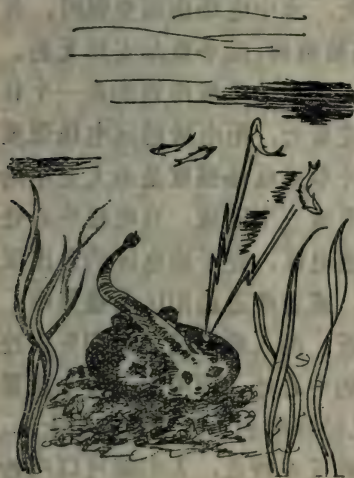


图51 电鳐放电杀死小鱼

板电极插入水中通以直流电以后，可在水中产生一个均匀电场，当通以弱电流时，鱼在弱电流的刺激下出现鳍震颤、惊慌乱窜等现象，称为感电反应。如果给予长时间的电刺激，鱼的上述反应消失，产生适应能力。当加大电压至某一水平时，鱼都向阳极方向游去，这种行为称为趋阳反应。再加大电压鱼就会失去控制运动能力，呼吸停止，腹部向上，处于假死状态，或者浮于水面或沉入水底，这种反应称为鱼的麻痹反应。若停止通电，几分钟后鱼的麻痹反应即可消失。从以上的实验可以看出，随着外加电压的逐渐加大，鱼可以先后相继出现感电反应，趋阳反应和麻痹死亡。但是出现以上不同反应时所需要的电压值，可因鱼体的大小不同而异，因为长度不等的鱼在同一电场中鱼体电压值不同，所谓鱼体电压值是指一条鱼在电场中从唇端至尾叉处所加的电压值。显然鱼体越大，鱼体电压值就越高。因此，水中电场由弱变强时，首先使大鱼先达到趋阳反应，继而被麻痹，而小鱼却安然无恙。在广阔水域进行实验表明，插入水中的电极得到的是一个非均匀的电场，在电极处电场强度最大，距电极越远电场强度越小，因而在电极周围自内向外形成电场强度是由大至小的梯度。对于鱼的刺激强度可以形成三个区域。自电极中心处向外分别为麻痹区、趋阳区和感电区，处于感电区的鱼出现不定向的乱窜，或者逃之夭夭，或者跳进趋阳区而被集中；位于趋阳区的鱼向阳电极处靠近；冲入麻痹区的鱼即失去控制运动的能力。如果在麻痹区的中心处，即阳极电极上设置一个强大的吸鱼泵、就可以把已经麻痹的鱼吸捕到渔船上。因此，利用鱼类在电场中的各种反应特点，人们就可以巧妙地利用鱼的趋阳反应把鱼集中，再使鱼麻痹后，用泵吸鱼上

船，开创工业化捕鱼的道路。不同种的鱼达到趋阳反应和麻痹反应所需要的电场强度不同，人们根据捕捞对象调整适当的电压参数，还可以有选择的捕鱼。同一种鱼由于个体大小的差异，鱼体电压不同，选择适当的电压强度使大鱼被捕，而小鱼则由于未达到趋阳反应可逍遥于电场之外，达到了捕大留小保护资源的目的。

在海洋里采用电-泵捕鱼，由于海水的电导率远比淡水为大，通以直流电后耗电量极大，而且难以形成趋阳电场。模仿电鱼发放电脉冲的方式，改用直流电脉冲后，使鱼的趋阳效果比直流电更为显著，人们从电鱼受到的启示获得了远比电鱼更为卓越的效果。但是只靠电场和鱼泵还不能大量捕鱼，因为捕鱼的能力直接与电场中趋阳区的大小有关。加大电场以扩大趋阳区的范围，势必也加大麻痹区的范围，如果超出鱼泵的有效吸程，即使鱼已麻痹也仍然不能吸捕，同样达不到多捕鱼的目的。此外，由于加大电场，耗电剧增更不经济，于是人们就采用综合仿生的方法，通过超声波探鱼仪，侦察鱼群所在海域，然后把灯光捕鱼与电-泵吸捕相结合，在水面上下设置灯火，水面上的灯光照射范围可达几海里，水下灯光也有几十米的范围，这样就可以扩大电场的作用范围，调配各种鱼类喜看的光色，水下播出鱼类熟悉的噪音，于是鱼群被它们“喜闻乐见”的信号所邀请，接踵而来，趋集在泵口，被诱捕到船上。实践证明，光、电-泵无网捕鱼是一种行之有效的新型捕鱼技术。它的优点在于产量高，鱼体无损伤，有利于保存，同时可以有选择地捕鱼，保护水产资源；另外，生产操作具有高度的自动化水平，可节省大量劳动。这种捕鱼技术在我国已初步获得成功，在不久的将来，一个工业化

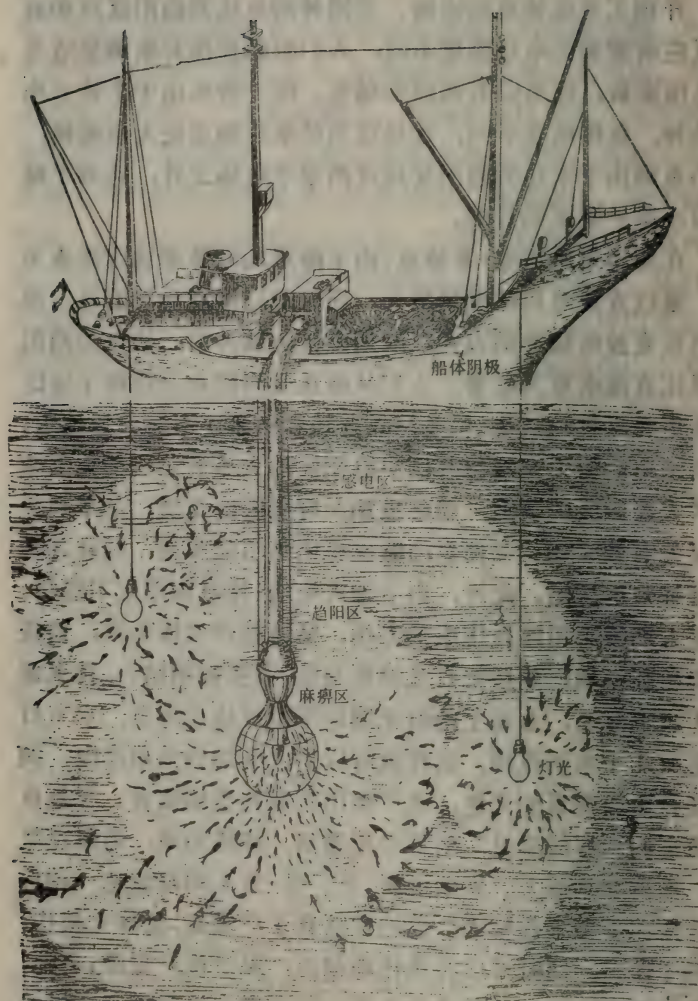


图52 电-泵捕鱼

捕鱼的前景将展现在眼前。

(二) 诱虫除害

种类繁多的昆虫世界,在广阔天地自由飞翔,各走东西,但是并非互不通讯,一旦“婚期”将至,即能发出求偶信号,使雌雄相会。信息的种类因虫而异,例如光、声以及发放化学物质,可谓各有千秋。人们可以模拟和掌握昆虫的这些“语言”信息,用来指挥昆虫的行动,达到诱捕灭虫的目的。

人们熟知的萤火虫就是以发出萤光作为求偶的信号,在它的交配期内,每当夏夜雄虫低空飞行,时而发出萤光召唤雌虫,雌虫发现萤光后,也发出短暂的闪光,使雄虫循光而来,直至雄雌相会。萤火虫约有一千五百种,每种各自发出不同的萤光,它们都有自己特有的求偶信号以避免“误会”。虽然大多数昆虫并不发光,但它们都有强烈的趋光性,成虫更为明显,因此,雌雄成虫也可趋光而聚。昆虫的趋光习性早为人们所熟知,我国劳动人民很早以前不仅以萤虫捕鱼,而且也知以火诱虫、消除虫害。俗话说“飞蛾扑火,自取灭亡”,正表明人们认识到昆虫的趋光性。在没有电的时候,人们用火把、油灯诱捕田间害虫。

大多数昆虫的一生都经历卵、幼虫、蛹、成虫四个时期,害虫对农作物的危害有的发生在幼虫期,有的发生在成虫期。一般昆虫的成虫都有较强的趋光性。进一步的分析研究表明,不同的虫子对不同波长的光其敏感性也不同。但是大多数农业害虫的视觉器官对波长为 $3300\sim 4000\text{\AA}$ 的紫外线特别敏感,具有最大的趋光性。人们掌握了虫子的这一癖性,投其所嗜,专门设计了能发出波长为 3600\AA 的黑光灯。它是

一种低气压汞气荧光灯，除了能辐射出波长为 3600 \AA 的不可见的紫外线外，还有人眼可见的紫灰色光辉。所谓“黑光灯”，只因在初期曾以黑玻璃做灯管壁而得名。在黑光灯的下面放置水盆，水中加进煤油和农药，夜晚开灯，诱来飞虫，扑灯落水，即被捕杀。但是不同的农业害虫对于不同波长的紫外线的敏感度有区别，例如：棉铃虫分别对波长为 3330 \AA 和 4050 \AA 的紫外光最敏感，粘虫对波长为 3750 \AA 的紫外光趋光性最强，一些粮食害虫则分别对 4450 \AA ， 4750 \AA 和 5460 \AA 的蓝绿光最敏感。因此，对于辐射紫外光波长范围较窄的黑光灯来说，对有些农业害虫就不易诱获或诱性不强。为此目前又出现了一些高效率诱虫灯。它们是一种金属卤化物灯，由于分别调加镓、钴、钨等金属，可产生不同的光色。如淡紫蓝、绿色和接近白色的光。这些新灯可辐射出红外光，可见紫外光的波长范围不仅宽广，而且还有许多紫外光谱线，形成某些波长的紫外光能量特别集中的区域。这样的诱虫灯对于绝大多数的农业害虫具有很大的诱性，而且诱捕害虫的种类也远比黑光灯为多，初步统计可达10个目、61科、414种。新灯的发光效率高，光亮度大，其诱虫的有效半径可达一公里，诱捕范围可达4700亩。若在农业害虫发生的高峰时期，开灯之后飞虫即从四面八方蜂拥而来，犹有“宾客如云”之势，在距灯二米的范围内，虫子密度往往达到惊人的程度。

有一些昆虫有灵敏的听觉，还可以接收到超声波，它们在交配期就是靠发出求偶的声音而相会。人们可以采用扰乱战术，在害虫交配期内，发出强大的超声波干扰成虫的交配求偶信号，致使交尾受阻而减少害虫的繁殖。此外，模拟昆虫的求偶声，还可以进行诱杀。现在已经能模仿两种蝼蛄的

求偶声。当播送出仿造的蝼蛄求偶声时，就有许多蝼蛄聚在扩音器处，跌入捕捉器而诱杀（图53）。



图53 用蝼蛄的求偶声诱杀蝼蛄

此外，还有一些昆虫对于天敌的呼叫声非常敏感，一旦收到天敌发出的声响，立即逃之夭夭。例如：蝙蝠是捕食农业害虫的能手，不少农业害虫只要收到蝙蝠发出的超声波，便慌忙逃避。因此，人们即模仿蝙蝠发出超声波的频率和强度，在田间播送，可以保护棉田免受象鼻虫蛾的灾害，并可大大减轻玉米钻心虫的危害。

昆虫还有一种绝妙的“语言”，就是由虫体发出一些气味，通过嗅觉而互通消息。利用微量分析化学技术，发现许多动物都是借助于气体物质而“交谈”的。这种传递信息的方式，称为化学通讯。动物释放出携带信息的物质称为信息素。在自然界中，雄虫所以能成功地找到雌虫进行交配，就

是依靠雌虫释放出的一种特殊的有挥发性的物质。雌虫循“味”而相会，昆虫在交配期释放出的信息素称为“性诱激素”或称“性信息激素”。

通过对一些蛾类的仔细解剖和研究，发现在雌蛾的腹部末端有一种能产生和释放挥发性物质的腺体，性诱激素就在这里产生，雄蛾没有鼻子，它是借助于头部的两根触角作为嗅觉器官的。当雌蛾放出性诱激素后，这种有气味的物质靠双翅快速振动产生的气流向外挥发和扩散，被雄蛾嗅到即能引导雄蛾找到雌蛾的所在地。如果将雄蛾头部的两根触角剪掉，即使把它和雌蛾放在一起，它也无法识别雌蛾。至今已发现有许多昆虫具有化学通讯的本领。仅鳞翅目就有一百多种雌蛾（或雌蝶）可以产生雌诱激素，如常见的家蚕、玉米螟、红铃虫等。此外，还发现有四十多种昆虫是由雄蛾（或雄蝶）来产生性诱物质的，其中尤以斑蝶一类的鳞翅目昆虫较多。在雄蝶腹部后端有一对可以伸缩的刷状物，可以发散出

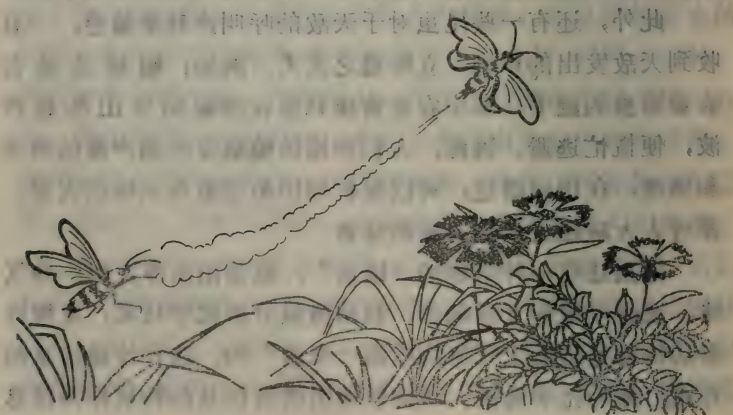


图54 雌蛾发出性诱激素使雄蛾循味而来

有气味的物质来引诱空中飞舞的雌蝶。除了鳞翅目以外，还有如直翅目、半翅目、同翅目、鞘翅目、双翅目等多种昆虫都具有产生性诱激素的本领。

性诱激素是在昆虫性成熟之后才释放出来，由雌蛾产生的性诱激素在其交尾前还有激起雄蛾兴奋的作用。但是，雌蛾一旦受精后，就立即停止释放性诱激素。昆虫性诱激素对于同种异性个体具有很大的诱性，每只雌蛾所含的性诱激素是极其微量的，仅有 $0.05\sim 0.1$ 微克。例如美洲的一种森林害虫叫舞毒蛾，一只雌蛾仅分泌 0.1 微克的性诱激素，但是诱来的雄蛾数竟达百万之众。性诱激素释放在空气中扩散含有这种物质的分子浓度将随着距雌蛾距离的加大而减少。然而，只有 $0.05\sim 0.1$ 微克的性诱激素竟可以将距离几十米，几百米甚至几公里以外的雄蛾引来。更为有趣的是昆虫的性诱激素还具有种的特异性，每种昆虫释放的性诱物质只对本种异性个体有效，如红铃虫的性诱激素只能对红铃虫有效，而玉米螟的性诱激素也只能诱来雄性玉米螟。

在自然界里，生物之间有密切的关系，例如很多虫媒花植物的生活与繁殖就离不开昆虫的“帮助”，每当开花传粉季节，各种虫媒花各显身手邀请昆虫光临。一般除了有鲜艳的花色，馥郁的花香和诱馋的花蜜外，有些植物还能散发出类似昆虫性诱激素一样的气味。例如某些兰花不仅能释放出与黄蜂性诱素相似的气味，而且它的花形也酷似雌蜂的样子，雄蜂嗅味而来，看见“假雌蜂”样的花朵便去“赴约”，这样雄蜂虽然“受骗”，却给兰花的授粉帮了大忙，可见兰花仿蜂颇为成功。这是生物仿生的又一个有趣的例证。植物诱虫可传粉，人类诱虫为除虫。人们采用化学仿生的方法，分

离和研究昆虫性诱激素的化学结构，进行人工合成。人们一旦掌握了昆虫性诱激素，也可以向昆虫发出“邀请”的信息，其结果则是“诱敌深入，聚而歼之”。

1959年人们从五十万只家蚕雌蛾腹部提取物中分离并鉴定出家蚕性诱激素的化学结构为10.12—十六碳二烯—1—醇，以后又陆续研究了十种鳞翅目的性诱激素的化学结构，发现它们基本上是属于含有12~18个碳原子的不饱和直链乙酸脂类化合物。它们的性诱能力与化学结构有密切的关系。某一种性诱激素在化学结构上的微小变动，就会失去性诱活性。人们利用人工合成的性诱物质可以将雄虫诱来予以捕杀，这样不但可以消灭成虫，而且还可以大大减少害虫的交配繁殖。因此，采用仿制昆虫化学通讯的手段为消灭害虫开辟了一条新途径。

模拟和掌握昆虫的声、光和化学通讯的本领，使人类能有效的控制昆虫的行为。人们可以有效地把害虫诱聚在一起进行消灭，例如：用1毫克人工合成的棉铃虫性诱激素与杀虫剂混合，分放在250~625个捕虫器内，在15亩的面积内每夜可诱杀一万只害虫。有人用一盏15瓦、波长为3650埃的黑光灯，在灯的顶端悬挂滴有红铃虫性诱激素的滤纸，在三个月内竟诱杀红铃虫达十四万只之多。这种方法不仅可有效使用杀虫剂，极大地抑制了害虫的繁殖，而且对害虫既不会引起抗药性，对人、畜也不造成危害和污染环境。

综上所述，研究昆虫的通讯语言、模仿昆虫的通讯本领、调动昆虫的行动以达到诱虫除害的效果。这不仅为防治害虫开辟了广阔的前景，而且也揭露了动物行为的秘密，并在人们面前展现出它们精巧的功能。例如一只雄蛾可以距雌

蛾有千米之遥，雌蛾释放出的性诱物质极其微量，扩散至其分子浓度已经微乎其微，雄蛾几乎仅能接受到单个分子，但这就足以引导雄蛾与雌蛾相会。这说明雄蛾的嗅觉感受器对于特异性物质有高度的敏感性。又如昆虫的听觉感受器仅仅由几个细胞组成，但它能凭此接收特异的超声波，准确地找到求偶的对象。这些精巧灵敏的感觉器官也为人们准备了仿生学的生物原型。

(三) 仿牛济猪

猪是杂食性的家畜，但以草食性饲料为主，适量的调配一些精料。日前农村养猪所用的青粗饲料一般为农作物的秸秆，如麦秸、玉米秸、豆秸、谷草、稻草等，这些粗饲料含有大量的纤维素（约30~50%）。虽然经加工粉碎后饲喂，但是猪吃了以后只能起到“填饱肚子”的作用，对纤维素很难消化吸收。在猪排出的粪便中包含大量的食物残渣，其中大部分是由未被消化的粗纤维所组成。

粗饲料中含有丰富的纤维素，基本上属于一种多糖化合物，如能被分解可以产生糖类或有机酸，就可以被猪吸收利用。猪为什么不能消化纤维素呢？猪和其他动物的消化过程一样，当食入饲料后，食物所含的各种物质都必须经机械消化和化学消化过程，将复杂的物质如淀粉、蛋白质、脂肪分解成简单的分子如葡萄糖、氨基酸和脂肪酸等。这个复杂的消化过程的实现，必须依靠消化液内所含有的各种酶。只有在各种消化酶的有效分解作用下，才能使食物中的各种物质转变成可被吸收的物质。猪是一种单胃的杂食性动物，在它的胃肠道内所分泌的各种消化液中，虽然也含有能分解多种物

质的消化酶，但是唯独缺乏可以消化分解纤维素的酶类。因此，猪对纤维素的消化能力很低。

我国开展利用发酵饲料养猪，粗饲料在糖化发酵过程中，微生物大量繁殖。由于微生物本身含有丰富的营养如蛋白质、维生素等而丰富了饲料的营养。微生物活动不断产生热量使粗饲料逐步软化。微生物体内含有一些能分解淀粉、蛋白质、脂肪、果胶等各种酶，也可使粗饲料中一些复杂物质得到初步的分解，有利于猪的消化和吸收，增加了饲料的营养价值。但是参与饲料发酵的微生物对于分解纤维素的能力很低，因此在发酵饲料中粗纤维仍然分解不多，猪食发酵饲料也不能增加对纤维素的消化和吸收的能力。

草食性动物对于纤维素的消化，主要靠微生物起作用。由于胃的构造不同，一般将草食动物分为反刍动物和单胃动物两类。反刍动物（如牛、羊等）的胃由四个胃组成，包括瘤胃、网胃、瓣胃和皱胃。其中瘤胃的容量最大，如牛的瘤胃加网胃的容积占胃总容积的64%，而皱胃最小，仅占11%。皱胃是复胃中唯一能分泌消化液的部位。瘤胃和网胃内含有极其丰富的微生物，包括细菌和纤毛虫类。据统计牛瘤胃内的食糜可达50~100公斤，而每一克食糜所含有的细菌竟有150~250亿个，纤毛虫有60万~100万只，使瘤胃（包括网胃）形成一个发酵罐。食物中容易消化的淀粉和糖类在瘤胃内迅速消失，食物中的蛋白质大部分被细菌分解，仅有少部分蛋白质到达皱胃和小肠。而瘤胃内微生物发酵对于纤维素的消化起着决定性的作用，可使食入粗饲料中50%的粗纤维被消化。在发酵过程中大量繁殖的微生物与食糜一起进入皱胃，动物再从消化这些微生物中得到氨基酸等营养物。动物

在食物中所能吸收的蛋白质约有20~30%是由瘤胃内微生物合成的。可见在反刍动物的消化过程中食物先由微生物发酵而后入小肠进行酶的消化。而微生物本身也被动物消化吸收。

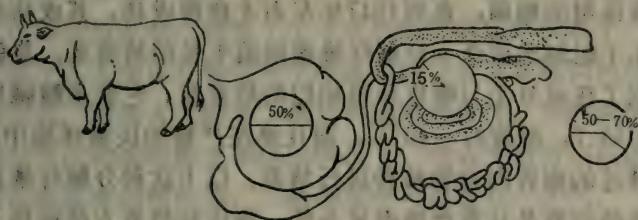


图55 牛对粗纤维的消化率

对另一类单胃的草食性动物如马（也包括猪）它们没有象瘤胃那样的“发酵罐”，进行微生物发酵的部位是在结肠和盲肠，因此结肠尤其是盲肠非常发达。但是发酵消化发生在酶消化之后，因此只有发酵产物对机体的消化和吸收是有用的，而微生物体对动物来说再被消化和吸收就很少了。在马的大肠内，纤维素和半纤维素消化不象在牛的瘤胃内那样完全，而猪的大肠内发酵对于饲料中纤维素的消化率更是十分低下，仅有15~20%。



图56 猪对粗纤维的消化率

人们对比了牛和猪对粗饲料消化率的不同，其原因就在于牛有一个卓有成效的“发酵罐”——瘤胃。在瘤胃中含有分解纤维素的微生物，能不能把这种微生物分离出来呢？在本世纪的前半叶，许多工作者曾试图培养出在瘤胃内起分解纤维素作用的细菌，直到1947年左右才获得成功。其成功的关键在于配制出适合于分解纤维素细菌生长的培养基，也就是模拟了在成分上与瘤胃环境相似的培养基。它要求酸碱度接近pH6.7，温度37~40℃，而且要在严格的厌氧环境中，用稀释过的瘤胃内容物接种进行培养。以上这种分解纤维素细菌的纯培养是非常严格而复杂的，将这种培养方法运用于实际，以提高猪对粗饲料的消化率尚有很大的距离。但是也给予人们有益的启示：如果给猪以仿制的牛瘤胃，就可使猪也能象牛和羊一样从瘤胃的发酵作用中得到好处。牛和羊的瘤胃是天然的“发酵罐”，我们可以仿造瘤胃的主要生理条件，如适宜的温度（38~40℃）和酸碱度（pH5.5~7.5），缺氧的环境和人工配制的含有糖类、氮、矿物质及水的发酵液。然后把牛瘤胃内的物质接种到发酵液内，并予以间歇式的搅拌，就可以使牛瘤胃内微生物在人工瘤胃内生长和繁殖，以发挥天然瘤胃的消化和代谢功能，即主要是分解纤维素和生产微生物蛋白质。猪吃到人工瘤胃内的发酵饲料，岂不是与体内具备有“发酵罐”的牛一样有相同的收益吗？人工瘤胃发酵饲料已经由江苏农学院畜牧兽医系研制成功。经过几年生产实践的检验与不断的改进，获得了较好的效果。经分析，粗饲料经人工瘤胃发酵后，粗纤维的分解率达到15~20%。猪吃了这种发酵饲料后也发生一系列生理变化，人工瘤胃饲料中的部分酶类进入消化道内，瘤胃微生物在猪的大肠内栖居

和繁殖增加，加强了猪消化道内微生物的发酵作用。而且粗饲料经过人工瘤胃的发酵过程，等于对粗饲料作了预处理，也有利于纤维素的分解和消化。因此使饲料中的纤维素在体内消化率的提高可达30%以上。于是饲料中粗纤维的总消化率可达到50%左右，达到了牛羊天然瘤胃消化率的水平。此外，由于人工瘤胃发酵饲料中纯蛋白的含量比原粗饲料增加50%左右，因而大大提高了粗饲料的营养价值。实践表明，在精饲料的种类和数量相同的情况下，喂人工瘤胃饲料的猪比喂自然发酵饲料的猪，一般增重率可提高15~30%。



图57 猪喂饲人工瘤胃饲料时对粗纤维的消化率

人工瘤胃饲料猪爱吃，能长膘、粪便肥效高。群众反映，以前的猪屎象驴粪，喂了人工瘤胃饲料后，猪屎变得象牛粪。事实说明，仿牛济猪，切实可行。

(四) 仿 菌 固 氮

生物种类繁多，形形色色，千姿百态，然而它们都是由蛋白质和核酸所构成。其中氮素是组成生命的基本元素之一。自然界中有极其丰富的氮素，在空气中占80%。有人计算在

面积为1平方米土地表面的空气柱中，竟含有约8吨的氮气，围绕在地球之外的大气层所含氮气足够生活在地球上的生物受用。然而生物如何向大自然索取它所需要的氮素呢？人和动物不能直接利用空气中的氮气，人和动物体内的氮素是直接或间接地来源于植物。但是绝大多数的植物也不能直接利用空气中的氮素。空气中的氮素只有和其他元素化合，固定在化合物中，如氮与氢化合成氨，或与氧化合成硝酸盐或亚硝酸盐，才能被植物所利用。植物从土壤中吸取氮的无机化合物在体内合成为氮的有机化合物，使人和动物获得蛋白质。那么大气中的氮如何不断地补充到土壤中转变成氮的无机化合物呢？原来在土壤中有一些细菌承担了这个重大的使命。它们具有把大气中的氮素固定成氨的本领，不断地补充土壤中的含氮无机物，植物吸收和利用土壤中的氨或硝酸盐，把氨转变成各种氨基酸，并使这些氨基酸结合成植物生长所需要的蛋白质。植物可被动物食用，通过腐烂的植物体、动物的粪便和动物的尸体，使氮又回到土壤中，此外土壤中还有另一种细菌可以把氮从化合物中还原出来再送回大气（此种细菌称为反硝化细菌）。从而完成了氮的循环（图58）。这样地球上氮素元素以各种无机化合物和有机化合物的状态循环于生物之间。在循环过程中，完全是依靠一些微生物的代谢活动，将空气中的氮素固定下来，构成了动物体内的蛋白质和核酸。同样也靠另一些微生物又把氮素释放到大气中。

生活在土壤中，具有固定大气中氮素本领的细菌称为固氮菌，它们犹如无数微小的单细胞工厂，每天生产着氮肥。根据它们在土壤中生活方式的不同分成两类。一种称为共生固氮菌，另一种称为自生固氮菌。

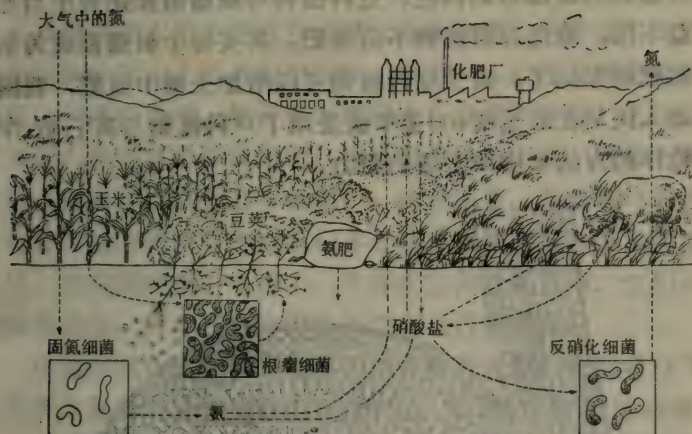


图58 氮的循环路线示意图

根瘤菌即是与植物共生的固氮菌，它们的生活与豆科植物有密切的关系。常见的豆科植物如大豆、蚕豆、豌豆、花生、苜蓿等都是重要的农作物，在生产实践中人们发现这些豆科农作物生长迅速，只需施用少量氮肥就能生长得枝叶茂盛。不仅果实蛋白质优质量多，而且还可增加土壤中的氮肥。是否豆科植物具有固氮的本领呢？当人们把豆科植物拔出地面后，发现它们的根上长了不少圆形而大小不等的“瘤子”，这就是根瘤。在根瘤里面挤满了数以百万计的根瘤菌。其实豆科植物的根瘤并非自生而有的，是由于土壤中存在有根瘤菌，它们只寻求豆科植物的根，侵袭而入，促使根部细胞膨大并分裂增多形成根瘤。根瘤菌在此安家，大量繁殖。它们将空气中的氮转变成氨，再转变成氨基酸供给豆科植物受用（图59）。而它们在固氮过程中作为能量而消耗的碳素可来自豆

科植物的根部得到供应。豆科植物与根瘤菌如此共生当然受益不浅，难怪豆科植物不需氮肥。其实每个根瘤都成为制造氮肥的车间了。由于豆科植物可以增加土壤中氮肥，我国劳动人民早在公元前400多年就采用了豆科植物与其它农作物轮作的方法来增加土壤的肥力。

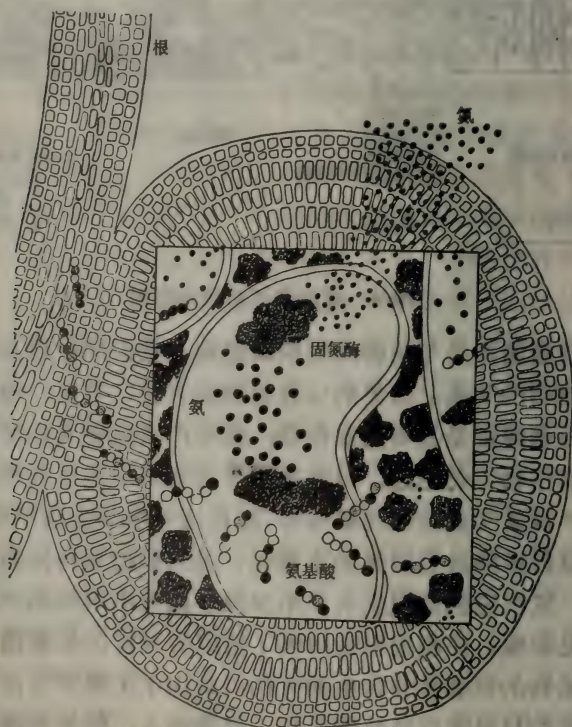


图59 根瘤菌的固氮作用

独立生活在土壤中能自行固氮的细菌称为自生固氮菌，如厌气性的巴氏梭菌，好气性的棕色固氮菌和兼性的光氏杆

菌等。它们在固氮时，有的需要碳源，也有的并不需要碳源，而是直接利用太阳光能进行固氮（光合细菌）。尽管自生固氮菌在固氮的能力上远不如根瘤菌。但是，人们还是要充分地利用这种固氮作用，把自生固氮菌进行分离和繁殖，人工培养制成大量的自生固氮菌肥，施于农作物的田中，增加土壤中的含氮量，以促进农作物增产。此外还有一些蓝藻（约五十余种），也有固氮作用，它们多分布在热带，亚热带及潮湿地区。在我国的南方水田中，也存在这种固氮蓝藻，它们多与绿藻共生，对于增加水田的氮肥有良好的效果。

生物固氮作用是微生物界的一个特有过程。它能将空气中的游离氮变成氨。依靠生物固氮，地球上每年能固定1.75亿吨氮素。而化学工业就1970年全世界的年产量比较还只能合成0.40亿吨的氨，由此足见生物固氮的重要性。如何更好的发挥生物固氮的作用呢？人们开展了许多课题的研究。

为什么根瘤菌只喜欢与豆科植物共生？近年的研究发现每一种根瘤菌都只和一种豆科植物共生，例如在大豆根瘤中的根瘤菌不会与苜蓿共生。进一步实验表明，豆科植物还含有一种含糖蛋白——称为外源凝集素，以大豆为研究材料，发现大豆的外源凝集素附着在根的表面。而根瘤菌的表面也有能附着于大豆外源凝集素的部位，但苜蓿的根瘤菌却不附着于大豆根部的外源凝集素上。因此，这种植物外源凝集素就只能与一种特殊的根瘤菌结合在一起，人们集中研究外源凝集素与根瘤菌结合的细节，一旦发现根瘤菌需选择其宿主的机制时，仿制根瘤菌对宿主要求的条件，引导根瘤菌也能与非豆科植物共生，那样就使所有农作物都可以配制上生物

氮肥厂了。

另一个重要的课题就是固氮酶的人工模拟。空气中的氮素是很不活泼的，不易与其它元素形成化合物。在本世纪初采用工业生产的方法，以天然气为原料来合成氨，需要消耗很大的能量。如以无机铁为催化剂合成氨时，必需在 500°C 的高温和300个大气压的条件下进行，而且合成氨的效率仍然很低，但是同样是大气中的氮素在固氮菌的细胞内，只是以常温常压的条件就能将氮催化还原成氨。固氮菌何以有如此高超的本领？近十几年来的研究表明各种固氮菌都是通过菌内一种具有特殊催化能力的蛋白质——固氮酶进行固氮的。虽然各种固氮生物不同，但是它们所含有固氮酶的结构却是十分相似的。为了寻找合成氨所需要的新型高效的催化剂，人们选择了化学仿生的道路，致力于固氮酶的人工化学模拟。近年来，固氮酶的生物固氮作用以及对它的化学模拟引起了国际上生物化学和化学工作者的重视而且已经取得一些可喜的进展。

首先是确定了固氮酶的提取方法。自1960年以来，以巴氏梭状芽孢杆菌为实验材料，用旋转式真空干燥器制备干细胞。将这种干细胞在厌氧条件下与缓冲液共同振荡，即可将固氮酶提取出来。利用离心力将细胞残渣去掉，固氮酶即留在提取液中。

现在人们已从各种类型的固氮菌中进一步分离和提取出固氮酶的两个组分。它们是两种蛋白质，分别称为钼铁蛋白和铁蛋白。钼铁蛋白的分子量为22万，含有两个不同的亚基。一个分子量为50700，另一个分子量为59500，钼铁蛋白是一个四聚体，含有两个分子量为50700的亚基和两个分子量为

59500的亚基，含有2个钼原子。铁和不稳定的硫的含量均为22~24个原子。比较不同固氮菌的固氮酶，其钼铁蛋白的结构极为相似。铁蛋白的分子量为55000，它是由两个完全相同的亚基组成。亚基的分子量为27500，它是一个二聚体含有4个铁原子。1974年我国科学工作者已经获得了固氮酶钼铁蛋白结晶，一年以后又在世界上第一次成功地分离到具有高度酶活性的钼铁蛋白二聚体。

关于固氮酶固氮作用的机制尚未十分清楚，它是一个还原过程，因此必须在厌氧条件下进行，当固氮酶进行固氮时，所需要的能源为三磷酸腺苷（ATP）平均每还原1个分子的氮需要21个ATP。钼铁蛋白不断地向四周捕捉氮气使之固定，进而合成氨。与此同时钼铁蛋白则被氧化，而铁蛋白与ATP结合成复合物，则犹如电子泵不断地将电子供应给钼铁蛋白再使之还原，以保证连续不断地进行固定氮的反应。两种蛋白配合默契缺一不可。随着对固氮机制的深入研究，对于固氮酶的人工模拟将会取得更快的进展，目前实验室内已经得到一些结构较简单而又具有固氮酶功能的模型。虽然尚不够完善，但是在研究生物固氮的道路上，人们已前进了一大步。我国近年来在生物固氮科学研究中开展了如固氮酶的生物化学、化学模拟以及固氮菌的转移等方面的工作。为发展我国农业所需要的氮肥寻找新途径，取得了可喜的进展，进行了大量的工作。采用化学仿生的方法对固氮酶化学模拟的成功对化学工业的生产也将产生深远的影响。

中科院植物所图书馆



S0014653

北京植物所

收到日期	85. 2. 13.
来源	西单新
书价	0.53
单据号	027186
开票日期	85. 2. 13.

生物与仿生

马祖礼 编

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷二厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本 787×1092毫米 1/32 印张 4.25 字数 88,000

一九八四年三月第一版

一九八四年三月第一次印刷

印数：1-1,400

书号：17212·8 定价：0.53元

责任编辑：黄立民

23805

生物与仿生

1984

58.1719

444

刘永光 8.8.3.45 9

刘永光 93.11.11

95 6 15.3.11

96.3.18

58.1719

444

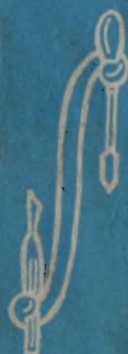
注 意

- 1 借书到期请即送还。
- 2 请勿在书上批改圈点，折角。
- 3 借去图书如有污损遗失等情形须照章赔偿。

23805

京卡0701

封面设计：王 众



科技新书目：78-215

书 号：17212·8

定 价：0.53 元